



Universidade da Coruña



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación

Tesis doctoral

SENSIBILIDAD AL AGUA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE FABRICADAS CON ÁRIDOS RECICLADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Autora:

Ana María Rodríguez Pasandín
Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Director:

Ignacio Pérez Pérez
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

A Coruña, abril de 2013



Universidade da Coruña



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación

Tesis doctoral

SENSIBILIDAD AL AGUA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE FABRICADAS CON ÁRIDOS RECICLADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Autora:

Ana María Rodríguez Pasandín
Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos

Director:

Ignacio Pérez Pérez
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

A Coruña, abril de 2013

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a mi director de tesis, Ignacio Pérez, por su apoyo incondicional, experiencia, dedicación y paciencia durante todos estos años.

También quería mostrar mi agradecimiento a todas aquellas personas y empresas que, de alguna u otra forma, han colaborado en la realización de esta tesis, aportando materiales para la investigación. A Tec-Rec, por suministrar el árido reciclado. A María Guede, de Probigasa, por el suministro de los áridos naturales y por estar siempre disponible para cualquier cuestión. A Nynas, por facilitar el betún necesario para la realización de la campaña de ensayos de laboratorio. A Sabas y Miguel, de Ecoasfalt, empresa suministradora de la emulsión bituminosa. A Cosmos, por el suministro de cemento.

También ha sido fundamental en el desarrollo de la presente tesis el trabajo y apoyo de todo el personal de laboratorio de la E.T.S.I. de Caminos de la Universidade da Coruña, por su inestimable colaboración durante la realización de los ensayos. Por ello desde aquí quiero dar las gracias de forma especial a Natalia, la más reciente incorporación, por su buen hacer, y a todos los becarios que han ido pasando por el Laboratorio de Caminos durante la realización de esta tesis: Sara, Alex, Antonio, Fran, Iván... Por supuesto, no puedo pasar por alto la valiosísima ayuda de María Recarey, laborante de la Escuela de Caminos, que siempre ofrece su colaboración y encuentra un momento para echar una mano cuando hace más falta y de la forma más agradable posible.

En general gracias también a todos mis compañeros de la E.T.S.I. de Caminos de la Universidade da Coruña. En especial a Marga y a Pay, por animarme y aguantarme en los momentos más bajos. También de forma especial a Silvia, Isabel, Julia, Pablo, Genma, Alfonso, Raquel, Jaime, Xabier y Cristina, por los buenos ratos y consejos. A Breixo y Margarita, ánimo, que vosotros sois los siguientes... Aunque ya no está en la Escuela y seguramente no leerá estas líneas, a Carlota Balsa, por el tiempo que dedicó a explicarme cómo hacer una buena bibliografía con Refworks.

Finalmente, me queda manifestar brevemente desde esta página mi agradecimiento a mi familia, por poder contar con ellos siempre, y no solo durante la realización de la tesis. A

madrina y padrino (†), por ser tan especiales; a mis padres y mi hermano, siempre dispuestos a ayudarme (cuidando a las niñas, desmoldando probetas, haciendo de chofer y guardaespaldas durante las horas nocturnas en la Escuela...); a Gonzalo, por apoyarme, animarme y estar ahí siempre que lo he necesitado; y, como no, a Carmen y Miriam, las mayores sufridoras de mis ausencias.

RESUMEN

Con el fin de colaborar con el desarrollo sostenible, se investiga en la presente tesis la utilización de áridos reciclados (ARs) de tipo hormigón procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente para capas de base de firmes de carreteras.

La revisión bibliográfica ha permitido apreciar una gran variabilidad en el comportamiento de estas mezclas, en particular, de su sensibilidad al agua. Por ello, su análisis es clave en la presente tesis doctoral.

Se ha llevado a cabo un exhaustivo análisis de la afinidad de los áridos con el ligante. Como resultado, se ha llegado a la conclusión de que la utilización de cemento gris como polvo mineral y la aplicación de un pretratamiento (reposo de la mezcla suelta en estufa durante 4 horas y preenvuelta del AR con emulsión bituminosa) mejoran la sensibilidad al agua de las mezclas en las que intervienen ARs de tipo hormigón.

Se ha fabricado una mezcla bituminosa en caliente AC 22 base G utilizando tanto árido natural como AR en porcentajes del 0%, 5%, 10%, 20% y 30%; se ha estudiado su sensibilidad al agua y se han ensayado sus propiedades mecánicas fundamentales (rigidez, resistencia a la deformación permanente y resistencia a la fatiga); y, finalmente, se han comparado los resultados de mezclas fabricadas con polvo mineral de cemento gris, con y sin pretratamiento y, en algunos casos, con variantes de los pretratamientos anteriormente indicados. Los resultados obtenidos indican que las mezclas analizadas presentan unas buenas propiedades mecánicas.

RESUMO

Co fin de colaborar co desenvolvemento sostible na presente tese investígase a posibilidade de empregar áridos reciclados (ARs) de tipo formigón, procedentes de residuos de construción e demolición (RCD), para a fabricación de mesturas bituminosas en quente para capas de base do firme das estradas.

A revisión bibliográfica permitiu apreciar unha gran variabilidade no comportamento destas mesturas, en particular, no que respecta á súa sensibilidade á auga. Por iso, a súa análise é clave na presente tese de doutoramento.

Levouse a cabo unha exhaustiva análise da afinidade dos áridos co ligante. Como resultado, chegouse á conclusión de que o emprego de cemento gris como po mineral e a aplicación dun pretratamento (repouso da mestura sen compactar na estufa durante 4 horas e preenvolta do AR con emulsión bituminosa) melloran a sensibilidade á auga das mesturas en que interveñen ARs de tipo formigón.

Fabricouse una mestura bituminosa en quente AC 22 base G utilizando tanto árido natural como reciclado en porcentaxes de 0%, 5%, 10%, 20% e 30%; estudouse a súa sensibilidade á auga xunto coas súas propiedades mecánicas fundamentais (rixidez, resistencia á deformación permanente e resistencia á fatiga); e, finalmente, comparáronse os resultados das mesturas fabricadas con po mineral de cemento gris, con e sen pretratamento e, nalgúns casos, con variantes dos pretratamentos anteriormente indicados. Os resultados obtidos indican que as mesturas analizadas presentan unhas boas propiedades mecánicas.

ABSTRACT

With the aim of collaborating with sustainable development, in the present thesis, the utilization of recycled concrete aggregates (RCA) from construction and demolition wastes (CDW) for the manufacture of hot mix asphalt (HMA) for base layers of road pavements is investigated.

The bibliographical review has shown a great variability in the performance of these mixtures, especially, in its water resistance. For this reason, moisture damage analysis is a key aspect in the present doctoral thesis.

An exhaustive analysis of the affinity between the aggregate and the binder has been conducted. As a result, it was concluded that the use of gray cement as mineral filler and the application of a pretreatment (letting loose mixture settle in an oven for 4 hours and coating RCA with bituminous emulsion) improves the water resistance of mixtures made with RCA.

A hot mix asphalt type AC 22 base G has been manufactured using both natural and RCA in percentages of 0%, 5%, 10%, 20% and 30%. Their water sensitivity has been studied and their fundamental mechanical properties were tested: stiffness, resistance to permanent deformation and fatigue resistance. The results of HMA made with gray cement filler, with and without pretreatment, and, in some cases, with variants of the pretreatments listed above have been compared. The results obtained indicate that the tested mixtures have good mechanical properties.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1.	ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA.....	1
1.2.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.3.	ORGANIZACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL.....	6

Capítulo 2

METODOLOGÍA

2.1.	DESARROLLO METODOLÓGICO.....	8
------	------------------------------	---

Capítulo 3

LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

3.1.	INTRODUCCIÓN.....	14
3.2.	DEFINICIÓN Y COMPOSICIÓN.....	15
3.3.	GENERACIÓN DE RCD.....	17
3.4.	GESTIÓN DE LOS RCD.....	21
3.5.	ÁRIDOS Y MATERIALES RECICLADOS PROCEDENTES DE RCD.....	25
3.5.1.	Generalidades.....	25
3.5.2.	Proceso de producción de los ARs.....	26
3.5.3.	Tipos y aplicaciones de ARs de RCD en capas de firmes de carreteras.....	27
3.6.	MARCO NORMATIVO, PLANES Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	29

Capítulo 4

LA UTILIZACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD EN MEZCLAS BITUMINOSAS

4.1.	INTRODUCCIÓN.....	33
4.2.	PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS DE TIPO HORMIGÓN.....	36
4.2.1.	Granulometría y estabilidad granulométrica.....	38
4.2.2.	Propiedades mecánicas y físicas.....	41
4.2.3.	Propiedades geométricas.....	44
4.2.4.	Otras propiedades de interés.....	49
4.3.	PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE FABRICADAS CON ÁRIDOS RECICLADOS DE TIPO HORMIGÓN.....	51
4.3.1.	Contenido de ligante y propiedades volumétricas.....	51
4.3.2.	Estabilidad y deformación Marshall.....	57
4.3.3.	Sensibilidad al agua.....	64
4.3.4.	Rigidez.....	69
4.3.5.	Resistencia a la deformación permanente.....	75
4.3.6.	Resistencia a la fatiga.....	82
4.3.7.	Comportamiento ante bajas temperaturas.....	85
4.4.	TRATAMIENTOS APLICADOS PARA LA MEJORA DE LAS PROPIEDADES DEL AR.....	86
4.5.	COMBINACIÓN DE AR DE TIPO HORMIGÓN CON ESCORIAS DE ACERÍA.....	92
4.6.	SÍNTESIS.....	94

Capítulo 5

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES BÁSICOS

5.1.	INTRODUCCIÓN.....	97
5.2.	CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS NATURALES.....	98
5.2.1.	Propiedades mecánicas y físicas.....	98
5.2.2.	Propiedades geométricas.....	100
5.2.3.	Composición química y fases cristalinas.....	102
5.3.	CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO RECICLADO.....	103
5.3.1.	Granulometría del AR.....	106
5.3.2.	Propiedades mecánicas y físicas.....	107
5.3.3.	Propiedades geométricas.....	111
5.3.4.	Composición química y fases cristalinas.....	114
5.3.5.	Composición química y fases cristalinas tras realizar el ensayo de Los Ángeles al AR.....	118
5.3.6.	Consideraciones finales sobre la caracterización del AR.....	120
5.4.	CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE.....	122
5.5.	CARACTERIZACIÓN DE LOS POLVOS MINERALES Y LA ECL-2D.....	123
5.5.1.	Cal hidratada.....	123
5.5.2.	Cemento.....	123
5.5.3.	Cenizas volantes.....	124
5.5.4.	Polvo mineral calizo comercial.....	124
5.5.5.	Emulsión ECL-2d.....	124

Capítulo 6

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA AFINIDAD ÁRIDO - LIGANTE

6.1.	INTRODUCCIÓN.....	126
6.2.	DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS.....	128
6.3.	INFLUENCIA DEL GRADO DE PENETRACIÓN DEL LIGANTE EN LA AFINIDAD ÁRIDO – LIGANTE.....	133
6.3.1.	Fabricación de las mezclas sueltas.....	133
6.3.2.	Resultados de la adhesividad pasiva mediante los ensayos “Boiling Water Test” y de la botella giratoria.....	135
6.3.3.	Influencia del tiempo de ensayo en el método de la botella giratoria.....	138
6.3.4.	Análisis estadístico de los resultados del apartado 6.3.2.....	141
6.4.	INFLUENCIA DEL POLVO MINERAL EN LA AFINIDAD ÁRIDO – LIGANTE.....	142
6.4.1.	Descripción del procedimiento seguido en este apartado.....	142
6.4.2.	Dosificación del contenido de cal apagada.....	144
6.4.3.	Resultados del “Boiling Water Test”.....	145
6.4.4.	Resultados de adhesividad pasiva según el ensayo de la botella giratoria.....	153
6.5.	INFLUENCIA DEL PRETRATAMIENTO DEL AR EN LA AFINIDAD ÁRIDO – LIGANTE.....	154
6.5.1.	Resultados de adhesividad pasiva con el “Boiling Water Test”.....	155
6.5.2.	Resultados de adhesividad pasiva con el ensayo de la botella giratoria.....	167

Capítulo 7

ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA

7.1.	INTRODUCCIÓN.....	172
7.2.	DESCRIPCIÓN DE LA MEZCLA BITUMINOSA ANALIZADA.....	174
7.2.1.	Tipo de mezcla.....	174
7.2.2.	Sustitución parcial por AR.....	175
7.2.3.	Materiales empleados.....	176
7.2.4.	Estabilidad granulométrica.....	177

7.2.5.	Designación de las probetas.....	180
7.3.	COMPARACIÓN DE LOS PRETRATAMIENTOS.....	180
7.3.1.	Parámetros analizados.....	180
7.3.2.	Sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con AR pretratado.....	186
7.3.3.	Relación entre el tiempo de reposo en estufa y la sensibilidad al agua.....	207
7.4.	DOSIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA CON LOS CONTENIDOS ÓPTIMOS DE BETÚN.....	213
7.4.1.	Introducción.....	213
7.4.2.	Dosificación de las mezclas mediante el ensayo Marshall y análisis de sus propiedades.....	214
7.4.3.	Análisis de la sensibilidad al agua de las mezclas elaboradas con el porcentaje óptimo de ligante.....	242
7.5.	RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE BETÚN Y LA SENSIBILIDAD AL AGUA.....	249

Capítulo 8

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE CON ÁRIDOS DE RCD

8.1.	INTRODUCCIÓN.....	254
8.2.	RIGIDEZ.....	254
8.3.	RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE.....	267
8.3.1.	Ensayo cíclico de compresión uniaxial.....	267
8.3.2.	Ensayo de rodadura (ensayo en pista de laboratorio).....	285
8.4.	RESISTENCIA A LA FATIGA.....	288
8.4.1.	Obtención de las leyes de fatiga.....	288
8.4.2.	Vida prevista de servicio.....	293

Capítulo 9

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

9.1.	CONCLUSIONES.....	296
9.2.	CONCLUSIONES RELATIVAS A LOS MATERIALES.....	296
9.2.1.	Propiedades del AR.....	296
9.2.2.	Influencia del grado de penetración del betún en la afinidad entre el árido y el ligante.....	298
9.2.3.	Influencia del polvo mineral en la afinidad entre el árido y el ligante.....	298
9.2.4.	Influencia de la aplicación de pretratamientos en la afinidad entre el AR y el ligante	299
9.3.	CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS.....	300
9.3.1.	Instabilidad granulométrica.....	300
9.3.2.	Contenido de ligante y propiedades volumétricas.....	300
9.3.3.	Sensibilidad al agua, resistencia a tracción indirecta y deformación vertical de rotura.....	301
9.3.4.	Estabilidad y deformación Marshall.....	303
9.3.5.	Rigidez.....	303
9.3.6.	Resistencia a la deformación permanente.....	304
9.3.7.	Fatiga.....	304
9.4.	RECOMENDACIONES.....	305
9.5.	LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS.....	306

Capítulo 10

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

10.1.	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	308
-------	---------------------------------	-----

ANEXOS

ANEXO 1	NORMATIVA APLICABLE A LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN.....	325
ANEXO 2	PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS COMPACTADAS.....	328
ANEXO 3	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	335
ANEXO 4	RESULTADOS DEL PROGRAMA KENPAVE.....	339

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.-	Producción de RCD en Europa en el año 2004.....	18
Tabla 3.2.-	Generación de RCD en España en el período 2001 – 2005.....	20
Tabla 3.3.-	Volúmenes de RCD producidos en el año 2006.....	20
Tabla 3.4.-	Destinos posibles de las fracciones de RCD.....	23
Tabla 4.1.-	Índice de degradación Marshall.....	41
Tabla 4.2.-	Coefficiente de Los Ángeles de diferentes ARs procedentes de RCD y áridos naturales	42
Tabla 4.3.-	Valores de densidad de las partículas de diferentes ARs procedentes de RCD y áridos naturales.....	42
Tabla 4.4.-	Absorción de agua de diferentes ARs procedentes de RCD y áridos naturales.....	43
Tabla 4.5.-	Huecos rellenos de ligante en mezclas fabricadas con sustitución parcial de AR.....	60
Tabla 4.6.-	Estabilidad y deformación Marshall de mezclas fabricadas con AR.....	61
Tabla 4.7.-	Parámetros Marshall de las mezclas fabricadas con AR y escorias de acería.....	93
Tabla 4.8.-	Resultados del ensayo de rigidez a tracción indirecta de las mezclas fabricadas con AR y escorias de acería.....	94
Tabla 5.1.-	Coefficiente de Los Ángeles de los áridos naturales.....	98
Tabla 5.2.-	Densidad y absorción de la corneana.....	100
Tabla 5.3.-	Densidad y absorción del gabro, la calcita dolomítica y el esquisto feldespático.....	100
Tabla 5.4.-	Caras de fractura del árido procedente de la corneana.....	101
Tabla 5.5.-	Porcentaje de sílice y óxido de calcio en los áridos naturales.....	102
Tabla 5.6.-	Coefficiente de Los Ángeles (LA) resultante de la combinación del AR y la corneana..	109
Tabla 5.7.-	Densidades y absorción de agua tras inmersión del AR.....	110
Tabla 5.8.-	Caras de fractura del AR.....	111
Tabla 5.9.-	Muestras de AR sobre las que se han realizado ensayos de difracción y fluorescencia de rayos X.....	114
Tabla 5.10.-	Fases cristalinas de diferentes muestras de AR y sus constituyentes.....	117
Tabla 5.11.-	Muestras analizadas por fluorescencia y difracción de rayos X antes y después de la realización del ensayo de Los Ángeles.....	119
Tabla 5.12.-	Fases cristalinas del AR utilizado en la realización del ensayo de Los Ángeles.....	120
Tabla 5.13.-	Características del betún.....	122
Tabla 5.14.-	Resultados de los ensayos de penetración, densidad y reblandecimiento anillo y bola..	123
Tabla 5.15.-	Principales características del cemento CEM II/B-M (V-L) 32,5 N utilizado como polvo mineral.....	123
Tabla 5.16.-	Composición de las cenizas volantes.....	124
Tabla 5.17.-	Propiedades del polvo mineral calizo comercial.....	125
Tabla 5.18.-	Propiedades de la emulsión ECL-2d.....	125
Tabla 6.1.-	ANOVA de dos factores para el ensayo “Boiling Water Test”.....	141
Tabla 6.2.-	ANOVA de dos factores para el ensayo de la botella giratoria.....	141
Tabla 6.3.-	Resultados de la dosificación del porcentaje de cal para el AR con el “Boiling Water Test”.....	144
Tabla 6.4.-	ANOVA de dos factores para determinar la influencia del tipo de árido y tipo de polvo mineral sobre el revestimiento obtenido con el “Boiling Water Test”.....	150
Tabla 6.5.-	ANOVA de dos factores para el análisis de la influencia en el tiempo de mezclado del tipo de árido y tipo de polvo mineral.....	152
Tabla 6.6.-	Resultados obtenidos en el ensayo “Boiling Water Test” tras someter al AR a un pretratamiento con lechada de cal.....	161
Tabla 6.7.-	ANOVA de dos factores para analizar la influencia del porcentaje de cal y del tiempo de absorción en el revestimiento.....	162
Tabla 6.8.-	Resultados obtenidos en el ensayo “Boiling Water Test” tras someter al AR a un pretratamiento con emulsión bituminosa ECL-2d.....	164

Tabla 7.1.-	Valores del contenido de huecos exigidos por el PG-3 para una mezcla bituminosa en caliente AC 22 base G.....	185
Tabla 7.2.-	Series de probetas fabricadas para el ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Mezclas con pretratamiento.....	186
Tabla 7.3.-	Resultados del ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Reposo de 4 horas en estufa.....	189
Tabla 7.4.-	Resultados del ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Preenvuelta del AR con ECL-2d.....	190
Tabla 7.5.-	Resultados del ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Varios tiempos de reposo en estufa.....	208
Tabla 7.6.-	Series de probetas fabricadas para el ensayo Marshall.....	216
Tabla 7.7.-	Criterios de dosificación empleando el ensayo Marshall según el PG-3 para capas de base y mezclas bituminosas en caliente de tipo G-20 (actual AC 22 base G).....	230
Tabla 7.8.-	Resultados de los parámetros del ensayo Marshall.....	233
Tabla 7.9.-	Resultados del ensayo de tracción indirecta tras inmersión.....	242
Tabla 7.10.-	ANOVA de tres factores para el análisis de la resistencia a tracción indirecta.....	247
Tabla 7.11.-	ANOVA de dos factores para el análisis de la resistencia conservada.....	247
Tabla 7.12.-	ANOVA de tres factores para el análisis de la deformación vertical de rotura a tracción indirecta.....	247
Tabla 7.13.-	Comparativa de los resultados de los ensayos de tracción indirecta tras inmersión para probetas sin pretratamiento y con un reposo de 4 horas en estufa.....	250
Tabla 7.14.-	Comparativa de los resultados de los ensayos de tracción indirecta tras inmersión para probetas con un 30% de AR sin pretratamiento y con un reposo de 4 horas en estufa.....	253
Tabla 8.1.-	ANOVA de cuatro factores para el análisis del módulo de rigidez a tracción indirecta.....	266
Tabla 8.2.-	ANOVA de tres factores para el análisis de la deformación permanente en el ciclo 1.800 a compresión uniaxial.....	284
Tabla 8.3.-	ANOVA de tres factores para el análisis de la pendiente media de deformación permanente en los ciclos 600 a 1.800 a compresión uniaxial.....	284
Tabla 8.4.-	Pendiente media de deformación en el ensayo de pista de laboratorio realizado sobre probetas fabricadas con el contenido óptimo de ligante y con reposo de 4 horas en estufa.....	287
Tabla 8.5.-	Probetas ensayadas a fatiga.....	290
Tabla 8.6.-	Datos de entrada del programa KENPAVE.....	294
Tabla 8.7.-	Vida previsible de las mezclas AC 22 base G fabricadas con distintos porcentajes de AR.....	295
Tabla A1.1.-	Normativa comunitaria aplicable a los residuos de construcción y demolición. Parte I.....	325
Tabla A1.2.-	Normativa comunitaria aplicable a los residuos de construcción y demolición. Parte II.....	326
Tabla A1.3.	Normativa estatal aplicable a los residuos de construcción y demolición. Parte I.....	326
Tabla A1.4.	Normativa estatal aplicable a los residuos de construcción y demolición. Parte II.....	327
Tabla A3.1.	Resultados medios obtenidos en el ensayo Marshall. Mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa.....	335
Tabla A3.2.	Resultados medios obtenidos en el ensayo Marshall. Mezclas sin pretratamiento.....	336
Tabla A3.3.	Descripción de las probetas fabricadas para obtener el módulo resiliente.....	337
Tabla A3.4.	Módulos resilientes obtenidos (MPa).....	338

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.-	Diagrama explicativo del desarrollo metodológico y sus fases.....	13
Figura 3.1.-	Composición media de los RCD.....	16
Figura 3.2.-	Evolución de la población ocupada en España en el sector de la construcción entre 1999 y 2010.....	19
Figura 3.3.-	Jerarquía de residuos.....	23
Figura 3.4.-	Ciclo cerrado de los RCD.....	26
Figura 3.5.-	Diferentes tipos de ARs procedentes de RCD: (a) de tipo hormigón, (b) cerámico y (c) de aglomerado asfáltico.....	29
Figura 4.1.-	Detalle del mortero adherido en el AR.....	36
Figura 4.2.-	Detalle de las impurezas de yeso presentes en el AR.....	37
Figura 4.3.-	Detalle de las impurezas flotantes presentes en una muestra de AR sumergida en agua.....	37
Figura 4.4.-	Fracciones granulométricas del AR: (a) Fracción gruesa y (b) Fracción fina.....	39
Figura 4.5.-	Densidad de las partículas del AR en función del contenido de mortero adherido.....	43
Figura 4.6.-	Absorción de agua del AR en función del contenido de mortero adherido.....	44
Figura 4.7.-	Imagen tomada con microscopio electrónico de barrido de distintos polvos minerales: (a) Polvo mineral procedente de RCD y (b) Polvo mineral calizo comercial.....	46
Figura 4.8.-	Realización del ensayo del equivalente de arena a ARs procedentes de RCD.....	47
Figura 4.9.-	Componentes de los ARs.....	48
Figura 4.10.-	Contenido de mortero adherido en función de la fracción granulométrica.....	49
Figura 4.11.-	Efecto de las microgrietas presentes en ARs afectados por reacciones álcali-sílice en la rotura de los áridos.....	50
Figura 4.12.-	Huecos en mezcla, huecos en el árido mineral, huecos rellenos de ligante, ligante efectivo y ligante absorbido.....	52
Figura 4.13.-	Variación del contenido de ligante en función del porcentaje de AR: (a) Contenido óptimo de ligante en función del porcentaje de AR y (b) Ligante absorbido en función del porcentaje de AR.....	55
Figura 4.14.-	Variación del contenido de huecos de la mezcla en función del porcentaje de AR: (a) Huecos de aire, (b) Huecos en el árido mineral y (c) Huecos rellenos de ligante.....	56
Figura 4.15.-	Variación de la densidad aparente de la mezcla en función del porcentaje de AR.....	57
Figura 4.16.-	Valores de la Estabilidad Marshall en la investigación llevada a cabo en Singapur....	60
Figura 4.17.-	Parámetros Marshall en función del porcentaje de AR: (a) Estabilidad Marshall, (b) Deformación Marshall y (c) Módulo Marshall.....	63
Figura 4.18.-	Resistencia conservada y resistencia a tracción indirecta de mezclas bituminosas en función del porcentaje de AR. Mezclas con árido silíceo y polvo mineral de cemento.....	67
Figura 4.19.-	Módulo resiliente de mezclas bituminosas fabricadas con sustitución parcial de AR.	71
Figura 4.20.-	Módulo resiliente en función del grado de compactación y del contenido de ligante.	72
Figura 4.21.-	Módulos resilientes a 25°C y 40°C para mezclas convencionales y con AR.....	73
Figura 4.22.-	Curvas maestras para el módulo dinámico en función de la frecuencia, para diferentes porcentajes de AR.....	74
Figura 4.23.-	Módulo resiliente en función del porcentaje de AR y de la temperatura.....	75
Figura 4.24.-	Deformación acumulada en el ciclo 2.520 del ensayo de pista de laboratorio a 60°C.	78
Figura 4.25.-	Deformación permanente de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con sustitución parcial de árido natural por AR mediante el ensayo de pista de laboratorio.....	80
Figura 4.26.-	Deformación permanente en función del porcentaje de sustitución de AR.....	81
Figura 4.27.-	Leyes de fatiga de las mezclas G-20.....	84

Figura 4.28.-	Leyes de fatiga de las mezclas S-20.....	84
Figura 4.29.-	Número de ciclos frente a microdeformación.....	85
Figura 4.30.-	AR preenvuelto con pasta de cemento.....	87
Figura 4.31.-	Estabilidad Marshall y contenido óptimo de ligante en función del porcentaje de sustitución de árido natural por AR preenvuelto con pasta de cemento.....	88
Figura 4.32.-	Sensibilidad al agua en función del porcentaje de sustitución de árido natural por AR preenvuelto con pasta de cemento.....	88
Figura 4.33.-	AR procedente de la demolición de edificios dañados por el terremoto de Wenchuan (China).....	89
Figura 4.34.-	Contenido óptimo de ligante, ligante efectivo y ligante absorbido.....	90
Figura 4.35.-	Deformación permanente en el ciclo 2.000 en mezclas fabricadas con AR y escorias de acería.....	93
Figura 5.1.-	Composición química de la corneana.....	103
Figura 5.2.-	RCD depositados en la planta de gestión y reciclado.....	104
Figura 5.3.-	Cabina de triaje.....	104
Figura 5.4.-	Armaduras extraídas mediante separador magnético.....	105
Figura 5.5.-	Detalle del AR (ZA25).....	105
Figura 5.6.-	Cuarteo de un big-bag de AR procedente de RCD.....	106
Figura 5.7.-	Curva granulométrica de la fracción 0/40 mm de los ARs.....	107
Figura 5.8.-	Muestra para la realización del ensayo de Los Ángeles a una combinación de un 80% de corneana y un 20% de AR de tipo hormigón.....	108
Figura 5.9.-	Coefficiente de Los Ángeles frente a porcentaje de AR.....	109
Figura 5.10.-	Composición de los ARs.....	113
Figura 5.11.-	Detalle de los principales componentes del AR.....	113
Figura 5.12.-	Composición química de los ARs según la fracción considerada.....	115
Figura 5.13.-	Composición química de los ARs según el constituyente considerado.....	116
Figura 5.14.-	Composición química del AR utilizado en la realización del ensayo de Los Ángeles.....	119
Figura 6.1.-	“Boiling Water Test”. Enfriamiento de la mezcla bituminosa suelta antes de su introducción en agua hirviendo.....	130
Figura 6.2.-	“Boiling Water Test”. Una vez alcanzada la temperatura deseada, la mezcla bituminosa suelta se introduce en agua hirviendo durante 10 minutos.....	131
Figura 6.3.-	“Boiling Water Test”. Muestras dispuestas en la toalla blanca de papel para su observación.....	131
Figura 6.4.-	Ensayo de la botella giratoria. Introducción de la mezcla bituminosa suelta en las botellas con agua destilada a 5°C.....	132
Figura 6.5.-	Ensayo de la botella giratoria. Detalle de las botellas con agua destilada y muestra de mezcla bituminosa suelta colocadas en el dispositivo para giro de las botellas.....	132
Figura 6.6.-	Ensayo de la botella giratoria. Observación de las muestras en agua destilada tras el giro.....	133
Figura 6.7.-	“Boiling Water Test”. Influencia del grado de penetración del ligante: (a) Revestimiento tras depositar sobre toalla blanca y (b) Revestimiento a las 24 h.....	139
Figura 6.8.-	Ensayo de la botella giratoria. Influencia del grado de penetración del ligante: (a) Revestimiento a las 6 h y (b) Revestimiento a las 24 h.....	139
Figura 6.9.-	Ensayo de la botella giratoria. Grado de revestimiento de betún en función del tiempo de ensayo: (a) B35/50, (b) B50/70 y (c) B160/220.....	140
Figura 6.10.-	Fracción 8/11,2 mm de corneana con un 4% de polvo mineral calizo comercial.....	143
Figura 6.11.-	Recubrimiento del ligante en la dosificación del porcentaje de cal para combinar con el polvo mineral procedente del AR mediante el “Boiling Water Test”. Observación a las 24 horas: (a) 0% de cal y (b) 1% de cal.....	146
Figura 6.12.-	“Boiling Water Test”. Influencia del polvo mineral: (a) Revestimiento tras depositar en toalla y (b) Revestimiento a las 24 horas.....	147

Figura 6.13.-	“Boiling Water Test”. Observación a las 24 horas: (a) AR con polvo mineral de cemento y (b) AR con polvo mineral reciclado.....	149
Figura 6.14.-	Tiempo de mezclado manual hasta llegar al 100% de recubrimiento, en función del tipo de árido y del tipo de polvo mineral.....	151
Figura 6.15.-	Ensayo de la botella giratoria. Revestimiento en función del tipo de polvo mineral empleado con los ARs.....	153
Figura 6.16.-	“Boiling Water Test”. Pretratamiento de reposo en estufa. Revestimiento en función del tiempo de permanencia en estufa de la mezcla suelta.....	156
Figura 6.17.-	“Boiling Water Test”. Observación a las 24 horas: (a) AR con 4 horas de reposo en la estufa y (b) AR con 0 horas de reposo en estufa.....	157
Figura 6.18.-	Aspecto solidificado de la lechada tipo 1 en comparación con las lechadas tipo 2 y 3.....	158
Figura 6.19.-	Escurrimiento del exceso de lechada en cestillo. Lechada tipo 3, con 1 semana (168 horas) de absorción.....	159
Figura 6.20.-	Aspecto solidificado de la lechada tipo 2 tras 1 semana (168 horas) de absorción.....	159
Figura 6.21.-	Retirada del exceso de lechada tipo 2 solidificada tras 1 semana (168 horas) de absorción, con ayuda de agua.....	160
Figura 6.22.-	Aspecto del AR con lechada de cal tras secado en estufa. Lechadas 2 y 3. Tiempo de absorción de 1 hora y 24 horas.....	160
Figura 6.23.-	Resultados obtenidos en el ensayo “Boiling Water Test” tras someter al AR a un pretratamiento con lechada de cal.....	161
Figura 6.24.-	“Boiling Water Test”. Revestimiento a las 24 horas: (a) AR con lechada con un 30% de cal, 1 h de absorción y (b) AR sin pretratamiento.....	163
Figura 6.25.-	Resultados obtenidos en el ensayo “Boiling Water Test” tras someter el AR a un pretratamiento con emulsión bituminosa ECL-2d.....	165
Figura 6.26.-	Revestimiento a las 24 horas con el “Boiling Water Test”: (a) AR preenvuelto con un 5% de ECL-2d y (b) AR sin pretratamiento.....	166
Figura 6.27.-	Ensayo de la botella giratoria. Comparación entre varios pretratamientos aplicados al AR.....	167
Figura 6.28.-	Botella giratoria tras 48 horas de giro: (a) AR sin pretratamiento (50%) y (b) AR preenvuelto con un 5% de ECL-2d (82%).....	169
Figura 6.29.-	Detalle de la fracción 8/11,2 del AR tras realizar la mezcla con un 3% de betún B50/70: (a) AR sin pretratamiento, (b) AR preenvuelto con ECL-2d y (c) Tras dejar 4 horas reposando en estufa a 170°C.....	171
Figura 7.1.-	Procedimiento seguido para analizar la sensibilidad al agua.....	173
Figura 7.2.-	Ubicación dentro del huso de la granulometría de la AC 22 base G.....	175
Figura 7.3.-	Áridos recuperados (de la mezcla AC 22 base G fabricada con un 5% de AR en la fracción 8/16 mm).....	177
Figura 7.4.-	Granulometría de las mezclas bituminosas fabricadas con AR tras mezclar y compactar. Obtenida a partir de los áridos recuperados.....	179
Figura 7.5.-	Introducción de la mezcla bituminosa en el molde Marshall.....	182
Figura 7.6.-	Compactación con maza Marshall.....	182
Figura 7.7.-	Probetas Marshall en el baño de agua.....	183
Figura 7.8.-	Rotura de las probetas a tracción indirecta.....	183
Figura 7.9.-	Carga frente a deformación vertical en el ensayo de tracción indirecta.....	184
Figura 7.10.-	Detalle del AR preenvuelto con ECL-2d cuando ya se ha producido la rotura de la emulsión.....	187
Figura 7.11.-	Resistencia conservada a tracción indirecta para el pretratamiento consistente en dejar 4 horas de reposo en estufa y el pretratamiento consistente en realizar una preenvuelta del AR con ECL-2d: (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.....	193
Figura 7.12.-	Resistencia conservada a tracción indirecta para el pretratamiento consistente en dejar 4 horas de reposo en estufa y el pretratamiento consistente en realizar una preenvuelta del AR con ECL-2d en función del porcentaje de AR.....	193

Figura 7.13.-	Resistencia a tracción indirecta en seco y húmedo frente a contenido de ligante para el pretratamiento consistente en 4 horas de reposo en estufa: (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.....	195
Figura 7.14.-	Resistencia a tracción indirecta en seco y húmedo frente al contenido de AR para el pretratamiento consistente en 4 horas de reposo en estufa.....	195
Figura 7.15.-	Resistencia a tracción indirecta en seco y húmedo frente a contenido de ligante para el pretratamiento consistente en realizar una preenvuelta del AR con ECL-2d: (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.....	197
Figura 7.16.-	Resistencia a tracción indirecta en seco y húmedo frente al contenido de AR para el pretratamiento consistente en la preenvuelta del AR con ECL-2d.....	197
Figura 7.17.-	Deformación de rotura frente a contenido de ligante para ambos pretratamientos (4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d): (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.....	199
Figura 7.18.-	Deformación vertical de rotura frente a resistencia a tracción indirecta para las mezclas fabricadas con ambos pretratamientos (reposo de 4 horas en estufa y preenvuelta con ECL-2d).....	199
Figura 7.19.-	Huecos en mezcla para ambos pretratamientos (4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d): (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.....	202
Figura 7.20.-	Huecos en el árido mineral para ambos pretratamientos (4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d): (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.....	204
Figura 7.21.-	ITSd, ITSw e ITSR frente a tiempo de reposo en estufa para una mezcla con el 20% de AR y un 4,5% de ligante.....	209
Figura 7.22.-	V _m y VMA frente a tiempo de reposo en estufa para una mezcla con el 20% de AR y un 4,5% de ligante.....	210
Figura 7.23.-	Granulometría de las mezclas bituminosas fabricadas con AR tras mezclar, dejar reposar 4 horas en estufa a 170°C y compactar. Obtenida a partir de los áridos recuperados.....	211
Figura 7.24.-	Comparación entre los resultados obtenidos para el revestimiento a las 24 horas con el “Boiling Water Test” y el ITSR. Mezcla con un 20% de AR y un 4,5% de betún.	212
Figura 7.25.-	Rotura de probetas con mordaza Marshall.....	215
Figura 7.26.-	Curvas con los parámetros del ensayo Marshall en función del contenido de ligante. Mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa.....	226
Figura 7.27.-	Curvas con los parámetros del ensayo Marshall en función del contenido de ligante. Mezclas sin pretratamiento.....	227
Figura 7.28.-	Huecos rellenos de ligante frente a contenido de ligante: (a) Mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa y (b) Mezclas sin pretratamiento.....	228
Figura 7.29.-	Módulo Marshall en función del contenido de ligante: (a) Mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa y (b) Mezclas sin pretratamiento.....	229
Figura 7.30.-	Contenido de ligante óptimo, contenido de ligante efectivo y absorción de ligante en función del porcentaje de AR.....	236
Figura 7.31.-	Parámetros Marshall con el contenido óptimo de ligante en función del porcentaje de AR.....	241
Figura 7.32.-	Resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo y resistencia conservada para probetas dosificadas con los óptimos Marshall.....	244
Figura 7.33.-	Deformación vertical de rotura frente a resistencia a tracción indirecta para las mezclas fabricadas sin pretratamiento y con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. Contenido óptimo de ligante.....	246
Figura 7.34.-	Comparativa de las resistencias en seco y húmedo frente a porcentaje de AR.....	251
Figura 7.35.-	Comparativa del índice de resistencia conservada a tracción indirecta frente a porcentaje de AR.....	251
Figura 8.1.-	Detalle de la máquina NU 14 con el utillaje para realizar el ensayo de rigidez a tracción indirecta (módulo resiliente).....	255

Figura 8.2.-	Ensayo de rigidez (módulo resiliente). Mezcla con un 5% de AR, un 4,0% de ligante y 4 horas de reposo en estufa.....	256
Figura 8.3.-	Diagrama típico de carga y deformación del ensayo de rigidez a tracción indirecta...	257
Figura 8.4.-	Módulos de rigidez en función del porcentaje de AR para las mezclas fabricadas con: (a) 4 horas de reposo en estufa, (b) 2 horas de reposo en estufa, (c) 0 horas de reposo en estufa (mezcla de control) y (d) AR preenvuelto con ECL-2d.....	262
Figura 8.5.-	Módulos de rigidez en función del porcentaje de AR para las mezclas que se han dejado reposar en estufa 4 horas, 2 horas y 0 horas: (a) Ensayo a 0°C, (b) Ensayo a 10°C y (c) Ensayo a 20° C.....	263
Figura 8.6.-	Módulos de rigidez en función del porcentaje de AR para las mezclas que se han fabricado con AR preenvuelto con ECL-2d y las mezclas sin pretratar: (a) 0°C, (b) 10°C y (c) 20°C.....	264
Figura 8.7.-	Módulos de rigidez en función del porcentaje de AR para las mezclas que se han dejado reposar 4 horas en estufa y las que se han fabricado con AR preenvuelto con ECL-2d: (a) 0°C, (b) 10°C y (c) 20°C.....	265
Figura 8.8.-	RLAT. Mezcla con un 30% de AR, un 3,5% de ligante y 2 horas de reposo en estufa.....	268
Figura 8.9.-	Configuración de la carga en el ensayo RLAT (se representan solo dos de los 1.800 ciclos de carga).....	269
Figura 8.10.-	Relación típica de las tensiones (σ) y las deformaciones (ϵ) con el tiempo (t), durante la aplicación de un ciclo de carga.....	270
Figura 8.11.-	Curva típica de fluencia (deformación axial acumulada en función del número de aplicaciones de la carga).....	272
Figura 8.12.-	Deformación axial permanente acumulada en función del número de ciclos de carga para las mezclas que se han fabricado con 4 horas de reposo en estufa: (a) Óptimo de ligante, (b) 3,5% de ligante, (c) 4,0% de ligante y (d) 4,5% de ligante.....	275
Figura 8.13.-	Deformación axial permanente acumulada en función del número de ciclos de carga para las mezclas que se han fabricado con 2 horas de reposo en estufa: (a) 3,5% de ligante, (b) 4,0% de ligante y (c) 4,5% de ligante.....	276
Figura 8.14.-	Deformación axial permanente acumulada en función del número de ciclos de carga para las mezclas que se han fabricado con 0 horas de reposo en estufa: (a) 3,5% de ligante, (b) 4,0% de ligante y (c) 4,5% de ligante.....	277
Figura 8.15.-	Deformación axial permanente acumulada en función del número de ciclos de carga para las mezclas que se han fabricado con AR preenvuelto con ECL-2d: (a) 3,5% de ligante, (b) 4,0% de ligante y (c) 4,5% de ligante.....	278
Figura 8.16.-	Deformación axial permanente en el ciclo final en función del porcentaje de AR y del pretratamiento aplicado: (a) 3,5% de ligante, (b) 4,0% de ligante y (c) 4,5% de ligante.....	280
Figura 8.17.-	Pendiente media de deformación entre los ciclos 600 y 1.800 en función del porcentaje de AR: (a) 4 horas de reposo, (b) 2 horas de reposo, (c) 0 horas de reposo y (d) Preenvuelta del AR con ECL-2d.....	282
Figura 8.18.-	Dispositivo pequeño del ensayo de pista de laboratorio. Probeta con un 5% de AR...	286
Figura 8.19.-	Deformación en función del número de ciclos de carga en el ensayo de pista de laboratorio.....	286
Figura 8.20.-	Ensayo de tracción indirecta para determinar la fatiga de las mezclas bituminosas. Probeta con un 0% de AR, contenido óptimo de ligante y pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa.....	288
Figura 8.21.-	Detalle de la carga repetida de medio senoverso aplicada durante el ensayo de fatiga a tracción indirecta.....	289
Figura 8.22.-	Fallo por fatiga de una probeta de mezcla bituminosa en caliente fabricada con un 30% de AR y 4 horas de reposo en estufa.....	291
Figura 8.23.-	Leyes de fatiga para mezclas con pretratamiento de 4 horas en estufa dosificadas con el óptimo de ligante.....	292
Figura A2.1.	Diagrama de componentes de una mezcla bituminosa, teniendo en cuenta la absorción de ligante.....	329
Figura A2.2.	Diagrama de componentes de una mezcla bituminosa, sin tener en cuenta la absorción de ligante.....	329
Figura A4.1.	Estado tensodeformacional obtenido mediante el programa KENPAVE para la mezcla AC 22 base G con un 0% de AR.....	339

Figura A4.2.	Estado tensodeformacional obtenido mediante el programa KENPAVE para la mezcla AC 22 base G con un 5% de AR.....	340
Figura A4.3.	Estado tensodeformacional obtenido mediante el programa KENPAVE para la mezcla AC 22 base G con un 10% de AR.....	341
Figura A4.4.	Estado tensodeformacional obtenido mediante el programa KENPAVE para la mezcla AC 22 base G con un 20% de AR.....	342
Figura A4.5.	Estado tensodeformacional obtenido mediante el programa KENPAVE para la mezcla AC 22 base G con un 30% de AR.....	343

ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AIPCR	Association Internationale Permanente des Congrès de la Route
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSi	British Standards Institution
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CEN	European Committee for Standardization
FEHRL	Forum of European National Highway Research Laboratories
FHWA	Federal Highway Administration
GERD	Asociación Nacional de Gestores de RCD
IECA	Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones
MDOT	Michigan Department of Transportation
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA

Reciben el nombre de residuos de construcción y demolición (RCD) aquellos desechos que son generados en el sector de la construcción como consecuencia de las demoliciones y de los rechazos de materiales (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009). Hasta la primera mitad del siglo veinte, depositar en vertedero este tipo de residuos, constituía una práctica habitual. Es bien conocido que el reciclaje de los RCD fue inicialmente concebido como respuesta a la escasez de materiales de construcción y a los elevados costes de vertido. En Europa, la destrucción provocada por la segunda Guerra Mundial, fue el desencadenante de la utilización a gran escala de materiales reciclados procedentes de RCD en el sector de la construcción. De hecho Francia y Alemania, entre otras naciones, utilizaron en la reconstrucción de sus redes de transportes grandes cantidades de escombros (Lund, 1996). Sin embargo, es en la actualidad cuando el uso de RCD está cobrando un mayor auge.

En los últimos años las causas para llevar a cabo el reciclaje han aumentado, ya que la utilización de materiales reciclados no constituye solamente una forma de reducir costes de vertido o de obtener materiales que de por sí serían escasos: el reciclaje se plantea como una vía de colaborar con el desarrollo sostenible a nivel mundial. El término desarrollo sostenible fue definido por primera vez en el informe Brundtland (1987) de las Naciones Unidas como aquel que consigue “*satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades*”. Dado que las economías mundiales son fuertemente dependientes de los recursos naturales, tanto la producción como el consumo sostenible de los mismos son fundamentales para alcanzar el bienestar económico a largo plazo y a nivel mundial.

Los áridos naturales utilizados en el sector de la construcción se extraen de depósitos sedimentarios o, más habitualmente, de canteras. Como consecuencia del proceso de extracción se pueden generar diversos impactos medioambientales, tales como ruidos, polvo, vibraciones, afecciones visuales y paisajísticas, agotamiento de recursos naturales, generación de canteras abandonadas, etc. Por tanto, dado el gran consumo de áridos en el sector de la construcción y teniendo en cuenta los impactos ecológicos que ello conlleva, resulta medioambientalmente imprescindible, para alcanzar un desarrollo sostenible, el

considerar otra fuente de obtención de áridos y materias primas, es decir, el reciclado de residuos.

En España no hay datos fiables sobre la producción de RCD, pero es bien sabido que se genera una ingente cantidad de este tipo de residuos. Sin embargo, a partir del año 2007, la tendencia creciente en la generación de residuos en el sector de la construcción se ha visto frenada como consecuencia de la crisis económica actual. Por ello, el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015 (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2009), indica la imposibilidad de estimar de forma exacta la producción de RCD en nuestro país, y la cifra de forma provisional en aproximadamente 40 millones de toneladas al año durante la vigencia del Plan. Es decir, se retrotrae a los niveles de generación de RCD que se estima que se producían en el año 2007.

Según los datos disponibles en el Centro de Estudios y Experimentación de obras Públicas una buena parte de los RCD generados, más de un 80% (CEDEX, 2010), se lleva a vertedero. Teniendo en cuenta que son uno de los residuos más pesados y voluminosos (European Commission, 2011a), su vertido ocasiona un fuerte impacto visual y paisajístico, además de un desaprovechamiento de espacios a los que se les podrían dar otros usos. También se genera un impacto ecológico negativo debido al rechazo de materias primas que, adecuadamente tratadas, podrían ser recicladas. En el caso de los RCD esto es sumamente importante dado su alto potencial de reutilización y reciclaje (European Commission, 2011a). Además, la contaminación de suelos y acuíferos puede surgir cuando los RCD no se separan adecuadamente en origen o se depositan en vertederos incontrolados. A pesar de los esfuerzos por erradicar este tipo de vertido, el PNIR estima que del total de RCD producidos en España un 50% ha sido objeto de vertido incontrolado.

Todos estos impactos medioambientales negativos, tanto los derivados de la extracción de árido natural como los derivados del vertido de RCD, pueden ser mitigados mediante el reciclaje. Además, en el caso de que se aprovechen residuos “locales”, su tratamiento también llevaría aparejado un ahorro en los costes de transporte. Por tanto, utilizar materiales reciclados, en concreto los procedentes de RCD como materia prima, es un hito fundamental para lograr el objetivo de la sostenibilidad.

No se disponen datos fiables sobre el nivel actual de reciclaje en España, aunque la Asociación Nacional de Gestores de RCD (GERD, 2010a) estima que está próximo al 15%. Este valor se encuentra alejado de los objetivos fijados tanto por la Directiva Marco de Residuos (Unión Europea, 2008) como por el PNIR. Así la Directiva Marco de Residuos establece que antes del 2020, el 70% en peso de la fracción no peligrosa de los RCD (excepto las tierras y piedras) deberá emplearse en cualquiera de las posibles formas de valorización; mientras que el PNIR establece que en el 2012 se deberá reciclar un 25% y aplicar otras formas de valorización a un 15% de los RCD, y en el 2015 un 35% se deberá reciclar y aplicar otras formas de valorización a un 20%.

A través del reciclaje de las fracciones mayoritarias de los RCD se obtienen nuevos áridos, que reciben el nombre de áridos reciclados (ARs), pudiendo distinguir entre ARs procedentes de hormigón (en adelante, ARs de tipo hormigón), ARs de aglomerado asfáltico, ARs cerámicos y ARs mixtos.

La utilización de ARs en el ámbito de la construcción es cada vez más frecuente, en campos muy variados tales como la construcción de rellenos y terraplenes, la fabricación de hormigón y la realización de capas de firmes. Para mantener esta tendencia creciente y dado que durante la construcción y conservación de carreteras se consume una gran cantidad de áridos, resulta necesario estudiar a fondo todas las posibles formas de uso de este tipo de residuos. En este sentido, se han llevado a cabo investigaciones sobre la utilización de ARs de tipo hormigón procedentes de RCD como materiales granulares (Bennert et al., 2000; Arm, 2001; Poon y Chan, 2006; Vegas et al., 2008; Jiménez et al., 2011, Vegas et al., 2011) y como materiales tratados con conglomerantes hidráulicos (Hansen, 1992; Cross et al., 1996; Yeo y Sharp, 1997; Rakshvir y Barai, 2006). También se ha estudiado el empleo de ARs de tipo cerámico, procedentes del machaqueo de ladrillos, para la fabricación de macadam bituminoso en caliente y en frío (Sobhan y Zakaria, 2001; Ellis et al., 2004), y mezclas bituminosas en caliente (Khalaf, 2004). Además, existen experiencias (Alaejos Gutiérrez y Calvo Calzada, 2010), tanto en nuestro país como en el resto de Europa, de empleo exitoso de ARs de tipo hormigón como capa granular y capa tratada con cemento en firmes de carreteras. Pero hasta la fecha sólo un limitado número de investigaciones han sido realizadas sobre el uso de ARs de tipo hormigón en mezclas bituminosas.

Es necesario aportar un mayor impulso que permita a los ARs pasar de tener un uso anecdótico a tener un uso generalizado. Pero hay que señalar que la utilización de ARs frente a áridos naturales presenta serios retos, entre los que destacan dos: tener un coste competitivo y satisfacer las exigencias técnicas. Así, por un lado, el menor coste de los áridos naturales unido a su mayor disponibilidad a nivel local suponen un inconveniente a la hora de generalizar el uso de los ARs (European Comission, 2011b). A pesar de que algunas de las fuentes consultadas (CEDEX, 2010) indican que el precio de venta de los ARs es inferior al de los naturales, puede decirse que, en general, esto no es así. La producción y la utilización de ARs llevan aparejada una serie de operaciones, como la demolición selectiva, la retirada de metales y otros materiales (papeles, plástico, etc) en planta o el transporte desde la planta hasta la obra, que provocan un aumento de los costes en comparación con el uso de los áridos naturales. Por otro lado, la elaboración de materiales de construcción con ARs podría incluir la aplicación de tratamientos o técnicas específicas necesarias para alcanzar una calidad similar a la obtenida por los materiales de construcción elaborados a partir de áridos naturales, lo cual también encarecería su utilización. Puede citarse a modo de ejemplo que en el Estado de Michigan (EE. UU.) se han establecido políticas que permiten el uso de materiales reciclados cuando su coste es como mucho un 10% superior al coste de los áridos naturales (Federal Highway Administration, 2004b).

Mediante un mayor conocimiento de los ARs y sus propiedades se podrán establecer especificaciones y limitaciones a su uso así como obtener productos cada vez de mayor calidad. Con la generalización de su empleo y la adopción de medidas que lo fomenten (el control de los vertederos ilegales, la implementación y homogeneización de tasas de vertido de RCD y tasas de extracción de árido natural, etc), podrán tener unos precios más competitivos en el mercado.

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

A partir de los trabajos llevados a cabo en el Laboratorio de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad da Coruña (UDC) en los proyectos de investigación BIA 2006-14742-C02-01 “Utilización de residuos de construcción y demolición en mezclas bituminosas de firmes de carreteras” del Plan Nacional de I+D+I (2004-2007) del Ministerio de Educación y Ciencia y

07TMT012118PR “Mesturas bituminosas fabricadas con residuos de construcción y demolición” del Plan Galego de Investigación, Desenvolvemento e Innovación (2006-2010) de la Xunta de Galicia (INCITE) se investiga en la presente tesis la posibilidad de utilizar **AR de tipo hormigón procedente de RCD** en la fabricación de **mezclas bituminosas en caliente** para capas de **base de firmes de carreteras**. Para ello se estudia la sensibilidad al agua de las mezclas elaboradas con este tipo de áridos y sus principales propiedades mecánicas, comparándolas con las de las mezclas convencionales.

El objetivo principal consiste en investigar sobre la aplicación de nuevas tecnologías que permitan utilizar este tipo de ARs con total garantía de funcionamiento, intentando valorizarlos al máximo, consiguiendo unas adecuadas prestaciones en la carretera y evitando impactos ecológicos, ambientales y paisajísticos negativos. Con ello se colaboraría así mismo a dar cumplimiento a los objetivos de reciclaje fijados por el PNIR y la Directiva Marco de Residuos.

Se han planteado los siguientes objetivos parciales:

- I. Elaborar el estado del arte sobre la utilización de ARs de tipo hormigón en mezclas bituminosas en caliente. Para ello es preciso realizar una búsqueda bibliográfica exhaustiva sobre la utilización de RCD como AR. Esta búsqueda se centrará en las investigaciones realizadas hasta la fecha sobre el empleo de ARs en capas de firmes y en particular en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente, tanto a nivel de ensayos de laboratorio como de experiencias reales de construcción, en el ámbito nacional y en el internacional.
- II. Determinar de forma preliminar la adhesividad tanto de los ARs como de diferentes áridos procedentes de cantera, habitualmente utilizados en la Comunidad Autónoma de Galicia, con diversos tipos de ligantes, polvos minerales y pretratamientos.
- III. Determinar la influencia de la introducción de distintos porcentajes de ARs en las propiedades volumétricas, la sensibilidad al agua y las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas en caliente.

- IV. Comparar los resultados de sensibilidad al agua y propiedades volumétricas y mecánicas obtenidos ensayando mezclas fabricadas con ARs, con los obtenidos para mezclas convencionales del mismo tipo.
- V. Establecer criterios para el diseño y la fabricación de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos procedentes de RCD, así como limitaciones tales como el porcentaje de AR a utilizar y la categoría de tráfico pesado para la cual son aptas.
- VI. Aportar recomendaciones para un futuro empleo de RCD como AR para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

1.3. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

En el **Capítulo 2** se detalla la metodología aplicada para la realización de la investigación contenida en la presente tesis doctoral.

En el **Capítulo 3** se da una visión general sobre el concepto de RCD, su producción y su gestión.

En el **Capítulo 4**, y como resultado de una exhaustiva revisión bibliográfica, se presenta el estado del conocimiento acerca de la utilización de RCD como AR en capas de firmes de carreteras, particularizando para el caso de las mezclas bituminosas en caliente. En esta revisión adquiere especial importancia tanto conocer las principales propiedades del AR como identificar la problemática que plantea su utilización en la fabricación de este tipo de mezclas bituminosas.

En el **Capítulo 5** se describen los trabajos realizados para la caracterización de los diferentes materiales empleados en la fabricación de las mezclas bituminosas en caliente, tanto áridos naturales como reciclados, ligantes y polvos minerales. Se presta una especial atención al análisis del AR procedente de RCD, ya que se tiene un menor conocimiento en general de este tipo de árido que de los áridos convencionales y del resto de los materiales. Las propiedades de los ARs resultantes de su caracterización se contrastan con las obtenidas por otros investigadores, según la revisión realizada en el estado del conocimiento.

En el **Capítulo 6** se describen los trabajos realizados con el fin de estudiar la adhesividad de los áridos con el ligante.

En la ejecución de estos trabajos se ha llevado a cabo un ensayo de laboratorio empleado comúnmente en España para el estudio de la afinidad entre el árido y el ligante, el método de la botella giratoria. También se han contrastado los resultados y se ha completado el estudio con el “Boiling Water Test” de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

En el **Capítulo 7** se dosifican y se estudia la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente para capas de base fabricadas con sustitución parcial de árido natural por AR procedente de RCD. Además se analiza la resistencia a tracción indirecta y la deformación vertical de rotura a tracción indirecta. Para todo ello se realizan ensayos Marshall y de tracción indirecta tras inmersión.

En el **Capítulo 8** se investigan las propiedades mecánicas. Se determina la resistencia a la deformación permanente mediante el ensayo de compresión uniaxial bajo cargas cíclicas y la rigidez mediante la obtención del módulo resiliente a tracción indirecta sobre probetas cilíndricas. También se analiza la fatiga a tracción indirecta del conjunto de mezclas que hayan aportado resultados más ventajosos según el análisis realizado en el capítulo 7. Sobre estas últimas mezclas también se determina la resistencia a la deformación permanente utilizando el ensayo en pista de laboratorio. Estos dos últimos ensayos se llevan a cabo sobre muestras dosificadas con el contenido óptimo de ligante determinado con el método Marshall.

En el **Capítulo 9** se detallan las conclusiones de la investigación realizada, indicándose también las futuras líneas investigadoras.

En el **Capítulo 10** se incluyen las principales referencias bibliográficas consultadas para la realización de la presente Tesis.

Capítulo 2

METODOLOGÍA

2.1. DESARROLLO METODOLÓGICO

Como se refleja en la figura 2.1, para la consecución de los objetivos enumerados en el capítulo introductorio, se ha seguido una metodología cuyas principales fases son:

Fase I:

En primer lugar, para elaborar un estado del conocimiento, se ha procedido a la recopilación y **revisión** de la información **bibliográfica** existente relativa a la temática en estudio:

- Se han recogido todos los datos **estadísticos y normativos** disponibles sobre generación de residuos de construcción y demolición (**RCD**) y su gestión, a nivel europeo y nacional. Esta información se ha recopilado con el fin de tener una idea tanto de la situación actual de la generación y reciclaje de RCD a nivel comunitario y nacional como de los objetivos de reciclaje y otras formas de valorización fijados por la normativa. Así mismo, a raíz del análisis de esta información, se ha extraído la necesidad de impulsar el reciclaje de RCD para dar debido cumplimiento a dichos objetivos.
- Se ha recogido toda la documentación existente sobre las **propiedades de los áridos reciclados** (ARs) de tipo hormigón procedentes de RCD, así como su empleo en la fabricación de los diferentes materiales que forman parte de las capas de los firmes. La búsqueda se ha centrado principalmente en su **utilización** como áridos para **mezclas bituminosas en caliente**, detallando las características particulares que los ARs de tipo hormigón confieren a las mezclas en las que intervienen. El fin último del análisis de esta documentación ha sido el de elaborar un estado del conocimiento y establecer las principales limitaciones y la problemática asociada al empleo de AR de tipo hormigón procedente de RCD en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

La documentación consultada se integra principalmente por artículos en revistas científicas, actas de congresos, informes y monografías, libros, tesis doctorales y normativa. También se ha obtenido información en páginas web de diferentes organismos relacionados con el mundo de la carretera. Las conclusiones relativas a la información

bibliográfica consultada se han recogido en los capítulos 3 y 4; mientras que todos los documentos consultados aparecen convenientemente reflejados en el capítulo 10.

Fase II:

Como resultado de la revisión bibliográfica realizada se ha visto la necesidad de plantear una campaña de **ensayos de laboratorio**. Así, se podrá profundizar en el conocimiento del diseño y comportamiento de las mezclas bituminosas fabricadas con AR de tipo hormigón procedente de RCD. Además, se podrán encontrar vías para que estas mezclas tengan un funcionamiento óptimo, similar al de las mezclas convencionales. Para ello, en esta segunda fase se han planteado los siguientes análisis de laboratorio:

- En primer lugar se ha procedido a **caracterizar los materiales** intervinientes en la composición de las mezclas bituminosas en caliente (polvos minerales, áridos y ligantes), centrando el estudio en la determinación de las propiedades de los ARs de tipo de hormigón procedentes de RCD, pues es el material del que se dispone un menor conocimiento hasta la fecha. En este sentido se ha dividido la caracterización de los ARs en dos partes:
 - Estudiar las **propiedades** mecánicas y físicas de los ARs (resistencia a la fragmentación, densidad y absorción), así como sus propiedades geométricas (forma, caras de fractura, evaluación de los finos y clasificación de los componentes) además de la composición química e identificación de fases cristalinas. Para estas dos últimas tareas se han llevado a cabo ensayos de fluorescencia y difracción de rayos X; mientras que para la determinación del resto de las propiedades se han llevado a cabo los ensayos más habitualmente utilizados en nuestro país, tales como el ensayo de Los Ángeles (AENOR, 1999b y 2007a), determinación de la densidad de las partículas y absorción de agua (AENOR, 2001 y 2006b), índice de lajas (AENOR, 1997 y 2004a), determinación de las caras de fractura (AENOR, 1999a y 2005), equivalente de arena (AENOR, 2000) y constituyentes del AR (CEN, 2009).
 - Estudiar la **afinidad entre el árido y el ligante**. Se ha realizado un ensayo de laboratorio empleado comúnmente en España, el método de la botella giratoria, según la norma UNE-EN 12697-11 (AENOR, 2007d). También se han

contrastado y completado los resultados del citado ensayo con el ensayo de “Boiling Water Test” (ASTM, 2005). El estudio de la adhesividad se ha planteado a su vez en varias etapas:

- ✓ En una primera etapa se ha estudiado la influencia del grado de penetración del ligante. Para ello se han realizado ensayos con diferentes áridos naturales (corneana, esquisto feldespático, gabro y calcita dolomítica) y los ARs de tipo hormigón procedentes de RCD, con betunes de diferentes penetraciones (B35/50, B50/70 y B160/220).
- ✓ En una segunda etapa se ha investigado la influencia del polvo mineral en la adhesividad de los ARs. Para ello se han estudiado cinco tipos de polvo mineral: el procedente del árido a ensayar, el procedente del árido a ensayar combinado con cal apagada, calizo comercial con un 98% de pureza, cemento portland compuesto (cemento gris) y cenizas volantes.
- ✓ En una tercera etapa se ha analizado la influencia de someter el AR a tres tipos de pretratamiento: preenvuelta del AR con emulsión bituminosa, reposo de la mezcla suelta en estufa y, por último, inmersión del AR en lechada de cal. De cada uno de los tres pretratamientos se han ensayado a su vez diversas variantes. Al final de esta tercera etapa se han seleccionado los dos pretratamientos que mejores resultados ofrecieron.
- En segundo lugar se ha investigado la **sensibilidad al agua** de las mezclas bituminosas fabricadas con sustitución parcial del árido natural por AR. Se han ensayado mezclas con porcentajes de sustitución del 0%, 5%, 10%, 20% y 30% de AR sobre la masa total del árido incluido el polvo mineral. También se ha procedido a su **dosificación**. Las mezclas se han fabricado tanto de forma convencional como con los dos pretratamientos anteriormente seleccionados. El fin último ha sido el de estudiar si éstos permiten mejorar, y en qué medida, el comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente fabricadas con AR de tipo hormigón procedente de RCD. Este estudio se dividió a su vez en tres etapas:
 - En la primera etapa se han analizado y comparado los dos pretratamientos seleccionados mediante el análisis de la afinidad entre el árido y el ligante.

Para ello se realizaron ensayos de tracción indirecta tras inmersión con diferentes porcentajes de betún. Como resultado de esta primera etapa se ha escogido el pretratamiento más ventajoso, tras un exhaustivo análisis de la sensibilidad al agua, la deformación y resistencia a tracción indirecta y de varias consideraciones prácticas.

- En la segunda etapa se ha profundizado en el conocimiento de las mezclas bituminosas fabricadas con sustitución parcial de AR fabricadas aplicando el pretratamiento más ventajoso según el análisis realizado en la etapa anterior. Además se han analizado las mezclas bituminosas fabricadas con AR sin pretratamiento y se han comparado con las mezclas fabricadas con el pretratamiento más ventajoso. Para ello se han obtenido los contenidos óptimos de ligante mediante el ensayo Marshall (MOPT, 1992). Con los óptimos se ha llevado a cabo la realización de ensayos de tracción indirecta tras inmersión (AENOR, 2006c). También en esta segunda etapa se ha llevado a cabo un análisis de la sensibilidad al agua de probetas de mezcla bituminosa fabricadas con un 20 % de AR y diferentes tiempos de reposo en estufa. El fin último de esta etapa es el de estudiar la influencia del tiempo de reposo en estufa en la sensibilidad al agua.
- En la tercera etapa se han planteado varios ensayos de tracción indirecta tras inmersión, con el fin de comprobar y matizar los resultados obtenidos.
- Finalmente con las mezclas dosificadas se ha llevado a cabo una investigación de las **propiedades mecánicas** de las mismas:
 - Rigidez mediante la obtención del módulo resiliente a tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (AENOR, 2006e).
 - Resistencia a la deformación permanente mediante dos tipos de ensayo: el de carga axial repetida sin confinamiento (BSi, 1996) y el de pista de laboratorio (AENOR, 2008).
 - Resistencia a la fatiga, mediante el ensayo de tracción indirecta aplicado a probetas cilíndricas (AENOR, 2007e).

La campaña de ensayos de laboratorio se encuentra descrita en los Capítulos 5 a 8.

Fase III:

A partir de las investigaciones realizadas se han podido extraer conclusiones y se han podido aportar recomendaciones para la posible utilización de AR de tipo hormigón procedente de RCD en capas de base de firme de carreteras. Por supuesto, también se han establecido las futuras líneas de investigación a partir de las cuales se podrá seguir desarrollando este tipo de material de construcción. Todo ello se encuentra descrito en el Capítulo 10.

.

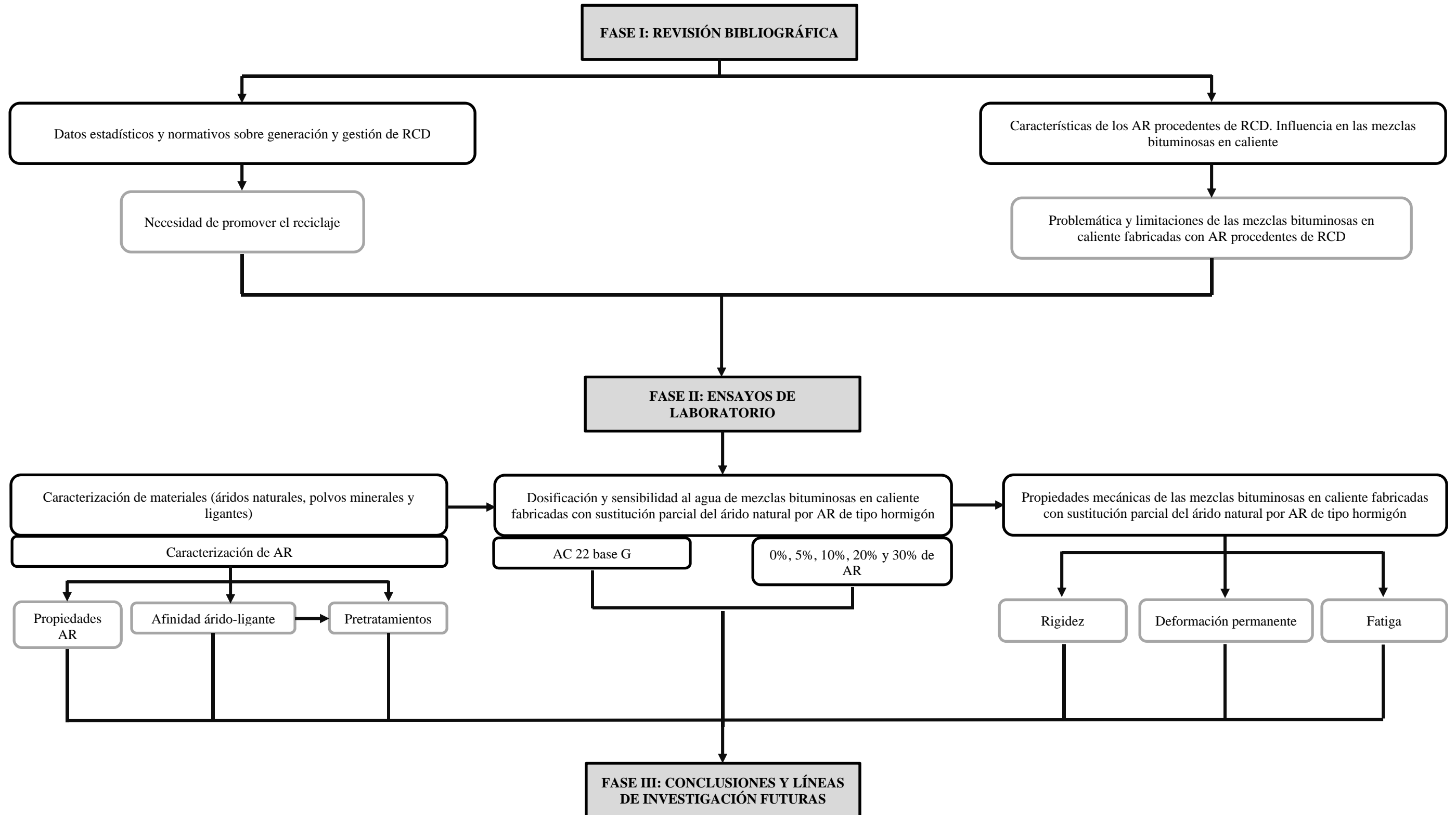


Figura 2.1.- Diagrama explicativo del desarrollo metodológico y sus fases.

Capítulo 3

LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

Durante la construcción, tanto de edificación como de obra civil, se consume una ingente cantidad de recursos naturales. Se pone así de manifiesto la importancia del sector de la construcción como firme candidato a la hora de utilizar residuos como materias primas. Y no solo residuos de construcción y demolición (RCD), sino también residuos procedentes de otros ámbitos.

Dentro del sector de la construcción, el mundo de la carretera constituye un caso singular. Dado que la red viaria se caracteriza por su gran extensión y por encontrarse diseminada a lo largo de toda la geografía, ofrece un gran potencial para el empleo de residuos. En este sentido es interesante destacar que la industria de la construcción de la carretera es el mayor consumidor de áridos a nivel europeo (Symonds et al., 1999). Además de consumirse áridos durante su construcción, también se consumen durante su conservación, proceso que se da de forma continuada en el tiempo y que subraya la importancia de la carretera como posible consumidor de áridos reciclados (ARs).

Pero la incorporación de residuos a la construcción y conservación de carreteras no consiste exclusivamente en la utilización de los mismos como ARs para capas de firmes, sino que también se puede realizar de alguna de las formas que a continuación se enumeran:

- Como materiales para rellenos y explanaciones.
- Como aditivos para ligantes y conglomerantes para capas de firmes.

Existen actualmente diversas experiencias sobre la incorporación de residuos en las capas de firmes de las carreteras. En el año 2002 se publicó la monografía “Catálogo de residuos utilizables en la construcción” (CEDEX, 2002). Posteriormente, se editó una versión electrónica actualizada del citado catálogo, en la que se amplía el número de residuos utilizables en el sector de la construcción, describiendo un total de 17 residuos (CEDEX, 2010). De la totalidad de los residuos considerados por la versión “on line” del “Catálogo de residuos utilizables en la construcción”, presentan aplicaciones dentro de la construcción y conservación de capas de firmes de carreteras, ya sea como ARs o como aditivos para ligantes y conglomerantes, un total de 8 residuos (estériles de carbón, escorias de varios tipos, cenizas volantes, etc). De todos ellos, destaca la utilización de

neumáticos fuera de uso (NFU) y residuos procedentes de la demolición de firmes en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

Los residuos procedentes de la demolición de firmes, son un caso particular dentro de los RCD, que no es objeto de la presente tesis. La Orden Circular 8/01 sobre reciclado de firmes (Ministerio de Fomento, 2001) indica que *“El reciclado de firmes existentes comprende una serie de técnicas constructivas tendentes al aprovechamiento integral de materiales envejecidos de firmes y pavimentos...”*. Se utiliza fundamentalmente como árido para mezclas bituminosas y capas tratadas con cemento.

Además de todos estos residuos, de la revisión bibliográfica se ha constatado la existencia de otros residuos que también se pueden utilizar en la construcción de capas de firmes de carreteras tales como: aceites usados de motor, plásticos, tejas asfálticas, etc (Del Val Melus, 1985; Ciesielski, 1994; NCHRP, 1994; NAPA, 1997; Ruiz Rubio, 2001; FHWA, 2004b; Hınıslıoglu y Agar, 2004; Taha et al., 2004; Akbulut y Güre, 2007; Huang et al., 2007; Huang et al., 2009; Rubio et al., 2010).

3.2. DEFINICIÓN Y COMPOSICIÓN

Los residuos de construcción y demolición (RCD) o “escombros” se definen en el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) para el período 2008-2015 como un tipo de residuo que procede de demoliciones de edificaciones y obras de ingeniería civil, así como de rechazos de los materiales de construcción empleados tanto en obras de nueva planta como en obras de rehabilitación o reparación (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009). Constituyen el material reciclable más importante en masa dentro del sector de la construcción (FEHRL, 2006) y se pueden agrupar en tres grandes bloques según su origen (Martínez Lage, 2006):

- Residuos procedentes de la construcción, rehabilitación y demolición de obras de edificación (se incluye la reparación domiciliar y se excluyen las tierras de excavación).
- Residuos procedentes de la construcción, rehabilitación y demolición de obras de ingeniería civil (ferrocarriles, carreteras, puentes, viaductos, obras hidráulicas, obras marítimas, obras portuarias, obras geotécnicas...).

- Tierras de excavación provenientes de cualquiera de las obras de los dos apartados anteriores (aunque normalmente no se consideran RCD).

Composición media de los RCD

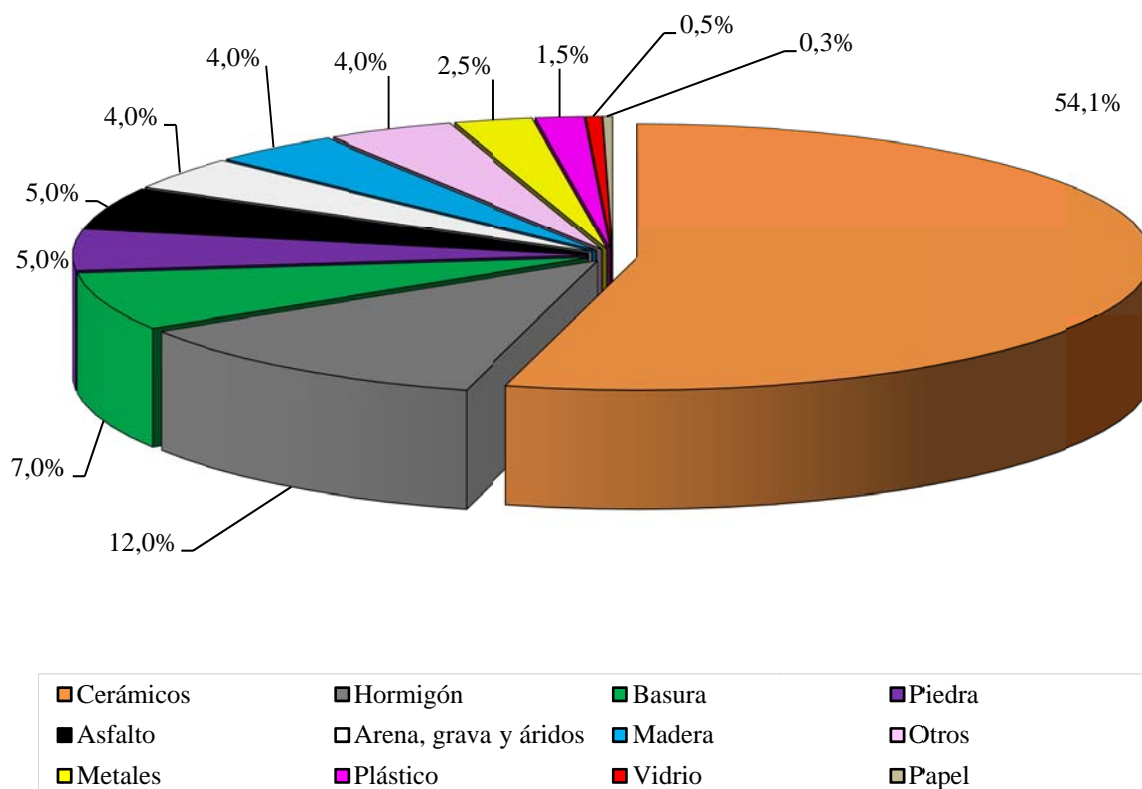


Figura 3.1.- Composición media de los RCD. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009).

El PNIR indica que este tipo de residuos se pueden considerar inertes o asimilables a inertes, aunque sin la adecuada separación en origen podrían contener pequeñas cantidades de residuos peligrosos tales como amianto, fenol, etc (European Commission, 2011b). Atendiendo a su composición, y tal y como puede verse en la figura 3.1, se puede decir que, de forma general, dentro de los escombros se encuentran materiales tales como hormigón, ladrillos, tejas, productos cerámicos, piedras, áridos, materiales bituminosos, metales, yeso, madera, vidrio, plástico, papel, cartón, basura y otros. La composición media de estos residuos, elaborada a partir de los datos de un estudio realizado en la Comunidad Autónoma de Madrid (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009), muestra que los RCD presentan una composición heterogénea. La mayor

parte está formada por materiales de tipo cerámico (54,0%), seguidos de lejos por el hormigón (12,0%). A continuación vendría la basura (7,0%), la piedra (5,0%) y el asfalto (5,0%). El hormigón y la piedra son los tipos de material de desecho presentes en los RCD que se estudian como AR en la presente tesis.

Los componentes de los RCD aparecen incluidos en la Lista Europea de Residuos (Ministerio de Medio Ambiente, 2002) bajo los códigos que se indican a continuación:

- 17 01 Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos.
- 17 02 Madera, vidrio y plástico.
- 17 03 Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados.
- 17 04 Metales (incluidas sus aleaciones).
- 17 05 Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje.
- 17 06 Materiales de aislamiento y materiales de construcción que contienen amianto.
- 17 08 Materiales de construcción a partir de yeso.
- 17 09 Otros residuos de construcción y demolición.

Los materiales objeto de la presente tesis, el hormigón y la piedra, se encuentran incluidos respectivamente en los códigos 17 01 y 17 05.

3.3. GENERACIÓN DE RCD

Los datos sobre generación de RCD a nivel europeo son muy limitados. En febrero de 1999, la Comisión Europea publicó el informe (conocido como el Informe Symonds) “Construction and Demolition Waste Management Practices, and Their Economics Impacts” (Symonds et al., 1999) en el que se ofrecieron datos sobre la producción de RCD en los países de la Unión Europea. A finales de los años 90, del total de los 179,70 millones de toneladas de RCD que se producían en Europa, 12,80 millones de toneladas (un 7,12%) se generaron en España. El mayor productor de RCD fue Alemania con 59,00 millones de toneladas (un 32,83%) y el menor Luxemburgo con 0,30 millones de toneladas (un 0,17%). En cuanto a la producción por habitante, el mayor productor era también Alemania (con 720 kg por habitante al año) y el menor Irlanda (con 162 kg por habitante al

año). España se encontraba en una posición intermedia en cuanto a la producción por habitante (325 kg por habitante al año).

El informe “EU as a Recycling Society” (Fischer y Werge, 2009) aporta datos más recientes sobre la producción de RCD en Europa. En el citado informe puede verse (tabla 3.1) que para el año 2004, el mayor productor fue Francia (5,50 t/hab.año) y los menores Letonia, Lituania, Polonia y Rumanía (con tasas inferiores a 0,2 t/hab.año). España se situaba en una posición intermedia (con 0,74 t/hab.año) respecto a la media europea (1,74 t/hab-año). Además, este informe indica que en el año 2009 se produjeron en Europa unos 850 millones de toneladas de RCD, lo que suponía un 31% del total de residuos generados.

País	Producción (t/hab.año)	País	Producción (t/hab.año)	País	Producción (t/hab.año)
Alemania	2,33	Grecia	0,37	Letonia	0,04
Reino Unido	1,66	Suecia	1,14	Lituania	0,10
Francia	5,50	Finlandia	3,99	Malta	1,95
Italia	0,80	Irlanda	2,74	Polonia	0,11
España	0,74	Luxemburgo	5,9	Rumania	0,00
Países Bajos	1,47	Noruega	0,70	Eslovaquia	0,26
Bélgica	1,06	Bulgaria	0,39	Eslovenia	-
Austria	0,81	Chipre	0,58	Letonia	0,04
Portugal	1,09	Estonia	1,12	EU-27 + Noruega	1,74
Dinamarca	0,83	Hungría	0,43		

Tabla 3.1.- Producción de RCD en Europa en el año 2004. Fuente: Fischer y Werge (2009).

Por otro lado, puede verse (tabla 3.1) que existen notables diferencias en cuanto a generación de RCD en los diferentes países considerados. Esto se debe por un lado a la falta de una definición común del término RCD a nivel europeo. Así por ejemplo, en países como Alemania se incluyen bajo la definición de RCD los residuos de excavación (Gómez-Limón et al., 2009). También influyen las tradiciones constructivas, el desarrollo económico en el sector de la construcción (Fischer y Werge, 2009) y la falta de registros estadísticos reales en algunos países (Gómez-Limón et al., 2009).

Además, cabe comentar que desde el año 1999 hasta el 2004 se ha producido un fuerte incremento en la generación de RCD por habitante. Así, la media europea pasó de ser de 0,481 t/hab.año en 1999 a 1,74 t/hab.año en 2004. En otros países, como por ejemplo Francia, el incremento fue espectacular, pasando de 0,404 t/hab.año en 1999 a 5,50 t/hab.año en 2004. En el caso de España el incremento experimentado por la tasa de producción de RCD por habitante llegó a ser algo superior al doble entre 1999 y 2004. Con

la actual crisis económica mundial es de esperar que esta tendencia no se mantenga o que incluso se invierta en la mayor parte de los países europeos.

En este orden de ideas, puede suponerse que durante los últimos años en la gran mayoría de estos países europeos la actividad constructora, tanto en el sector de las obras públicas como en el de la edificación, se ha modificado considerablemente dando lugar a una diferente generación de RCD. Así, en el caso particular de España, se puede observar en la figura 3.2 una tendencia creciente de la población ocupada en el sector de la construcción entre los años 1999 y 2007, así como otra decreciente, debido a la coyuntura económica, a partir de 2008 y hasta 2010. Lógicamente el auge del sector de la construcción entre 1999 y 2007 tuvo que llevar aparejado un incremento en la generación de residuos.

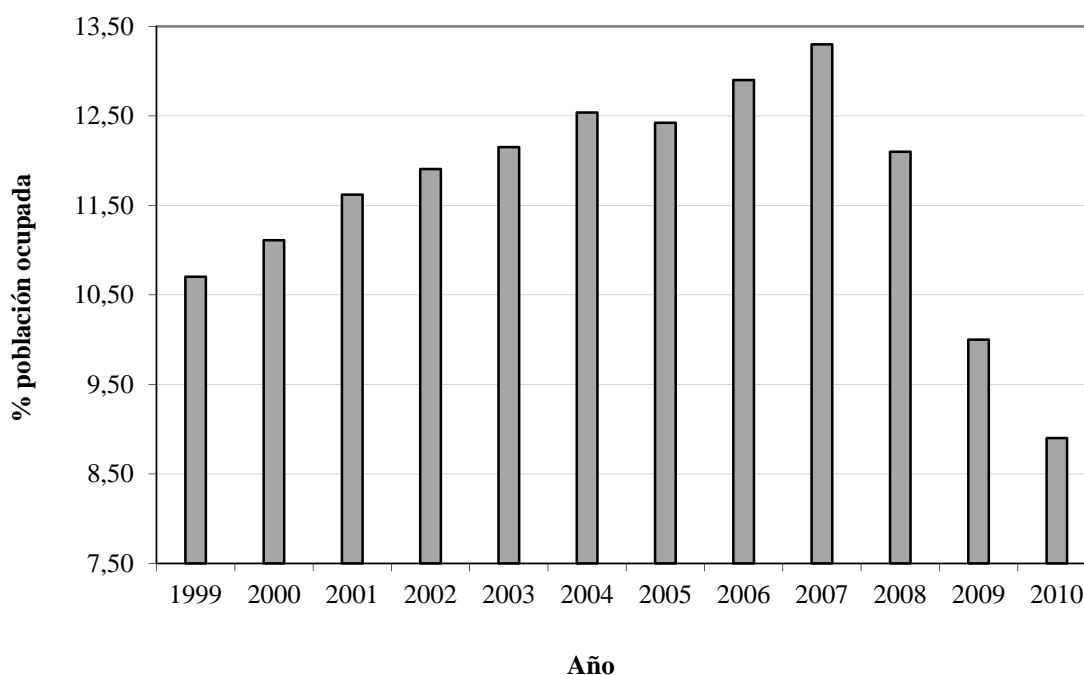


Figura 3.2.- Evolución de la población ocupada en España en el sector de la construcción entre 1999 y 2010. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INE.

Aunque la información disponible sobre la producción de los RCD en España es muy dispersa y heterogénea, según los datos recogidos en el PNIR puede estimarse que los RCD generados en España entre los años 2001 y 2005 fueron los que se indican en la tabla 3.2. Como puede verse la tendencia creciente en la evolución de la población ocupada en el sector de la construcción entre los años 2001 y 2005 (figura 3.2) se vió acompañada por un

incremento en la producción de RCD entre los citados años. Así, los 12,8 millones de toneladas de RCD generados en el año 1999 en España pasaron a ser 24,2 millones de toneladas en 2001 y 34,8 millones de toneladas en 2005 (tabla 3.2). Además, puede decirse (tabla 3.2) que la edificación generó una mayor cantidad de RCD que la obra civil, de tal forma que en el año 2005, un 72,97% de los RCD procedían de la edificación frente a un 27,03% que se originaban en obra civil.

Tipo de obra / Año	2001	2002	2003	2004	2005
Edificación	17.667.189	17.495.175	20.298.601	23.054.631	25.427.665
Obra civil	6.543.403	6.479.649	7.518.000	8.538.752	9.417.654
Total	24.210.592	23.974.824	27.816.601	31.593.383	34.845.319

Tabla 3.2.- Generación de RCD en España en el período 2001 – 2005. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009).

Los datos más recientes sobre la producción de RCD en España, en concreto para el año 2006, han sido extraídos del informe estadístico de la Asociación Nacional de Gestores de RCD (GERD, 2007). Así, en la tabla 3.3 se incluyen los datos de producción para cada una de las comunidades autónomas. Puede verse que la producción en España para el año 2006 fue del orden de 38,9 millones de toneladas.

Comunidad autónoma	Estimación de la producción de RCD (T/año)	Comunidad autónoma	Estimación de la producción de RCD (T/año)	Comunidad autónoma	Estimación de la producción de RCD (T/año)
Andalucía	6.232.097	Cantabria	495.185	Navarra	442.395
Aragón	1.067.077	Catalunya	6.346.828	La Rioja	242.242
Asturias	1.003.877	Galicia	2.082.062	Valencia	4.091.108
Castilla-La Mancha	1.316.387	Euskadi	1.981.129	Baleares	926.080
Castilla-León	2.038.699	Madrid	6.900.597	Extremadura	730.969
Canarias	1.735.604	Murcia	1.215.742	TOTAL	38.962.791

Tabla 3.3.- Volúmenes de RCD producidos en el año 2006. Fuente: GERD (2007).

No hay otros datos estadísticos más fiables y además, tal y como se ha comentado anteriormente, a partir del año 2007 la tendencia creciente en la generación de residuos se ha visto truncada como consecuencia del marco económico actual. Por tanto, resulta imposible determinar una cifra exacta para la producción de RCD a corto y medio plazo. Para solventar esta carencia, el PNIR toma como cifra provisional aproximada para la producción de RCD durante la vigencia del Plan, 40 millones de toneladas al año (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2009). Se retrotrae así aproximadamente a niveles del año 2007. No obstante, esta cifra se ha reducido

considerablemente, al igual que la actividad constructora en España. En este sentido, si se analizan los datos disponibles en Cataluña, uno de las comunidades autónomas con mayor generación de RCD de España (CEDEX, 2010), puede verse que se ha producido un descenso en la gestión de estos residuos. Así, entre los años 2007 y 2010, se produjo una disminución de entre un 25% y un 36% anual, alcanzando en 2011 su mínimo histórico, con un descenso del 9% respecto al 2010 (ECOTicias.com/Red/Agencias, 2012). Si se extrapolase a toda España esta tendencia, la cifra de producción de RCD para el año 2011 sería del orden de los 10 millones de toneladas, es decir, una cuarta parte de la prevista por el PNIR.

3.4. GESTIÓN DE LOS RCD

Como se ha comentado anteriormente, hay algunos materiales y sustancias que forman parte de los RCD que pueden tener alguna característica de peligrosidad. No obstante, mediante una adecuada recogida selectiva en origen, la gran mayoría pueden considerarse inertes o equiparables a inertes, por lo que su poder contaminante es escaso.

De todas formas una inadecuada gestión y/o una recogida no selectiva pueden provocar que al mezclarse las distintas fracciones, se obtenga un residuo contaminado en su conjunto. De esta forma, el residuo resultante o bien no se podría someter a un aprovechamiento apropiado o bien no sería apto para su depósito en vertedero. Esto, unido al elevado impacto visual, paisajístico y ecológico negativo de los RCD, hace necesaria su correcta gestión, para así reducir las cantidades generadas en origen y además obtener el máximo provecho del potencial que presentan estos materiales para ser utilizados como materiales secundarios.

La gestión de los RCD incluye un conjunto de actividades que tratan de proporcionar a estos residuos el uso más adecuado, con el fin de proteger la salud humana, los recursos naturales y el medio ambiente (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009). Esas actividades, según la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (Gobierno de España, 2011), pasan por *“la recogida, el transporte y tratamiento de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en calidad de negociante o agente”*.

A nivel europeo, la Directiva Marco de Residuos (Unión Europea, 2008) basa la gestión de los RCD en la regla de las “4 Rs” promovida por el Banco Mundial en 1992 (Banco Mundial, 1992). En España se han desarrollado dos Planes Nacionales de Residuos. Tanto el primero de ellos, el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006 (Ministerio de Medio Ambiente, 2001) como el PNIR, actualmente vigente, basan la gestión de los RCD en esta misma regla. Se indican a continuación, según su orden de prevalencia, las opciones de gestión que considera la regla de las “4 Rs” (figura 3.3):

- **Reducción** en la producción de residuos como medida preventiva. Se trata tanto de limitar la generación de residuos como de disminuir la cuantía de sustancias peligrosas o contaminantes presentes en ellos.
- **Reutilización** de los residuos con un pequeño tratamiento específico. En este caso el producto se utiliza con el mismo fin para el que fue originalmente concebido.
- **Reciclado** de los residuos tras un tratamiento. Los residuos se someten a una transformación dentro de un proceso de producción para poder ser utilizados nuevamente, tanto para el mismo fin para el que fueron concebidos como para fines diferentes.
- **Revalorización** o **valorización energética** de los residuos o cualquier otra forma de valorización no incluida en las etapas anteriores. La Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, define el término valorización como *“cualquier operación cuyo resultado principal sea que el residuo sirva a una finalidad útil al sustituir a otros materiales, que de otro modo se habrían utilizado para cumplir una función particular, o que el residuo sea preparado para cumplir esa función en la instalación o en la economía en general”*. Por tanto, bajo esta definición se incluirían entre otras, las operaciones de reutilización y reciclado. Sin embargo, a pesar de la definición genérica del término, en esta cuarta etapa se añade al término “revalorización” o “valorización”, el adjetivo “energética”, es decir, la valorización o revalorización energética, para matizar que es la orientada fundamentalmente a la recuperación o aprovechamiento energético. También se incluyen en esta cuarta etapa otras formas de valorización que no sean ni la reutilización ni el reciclado.

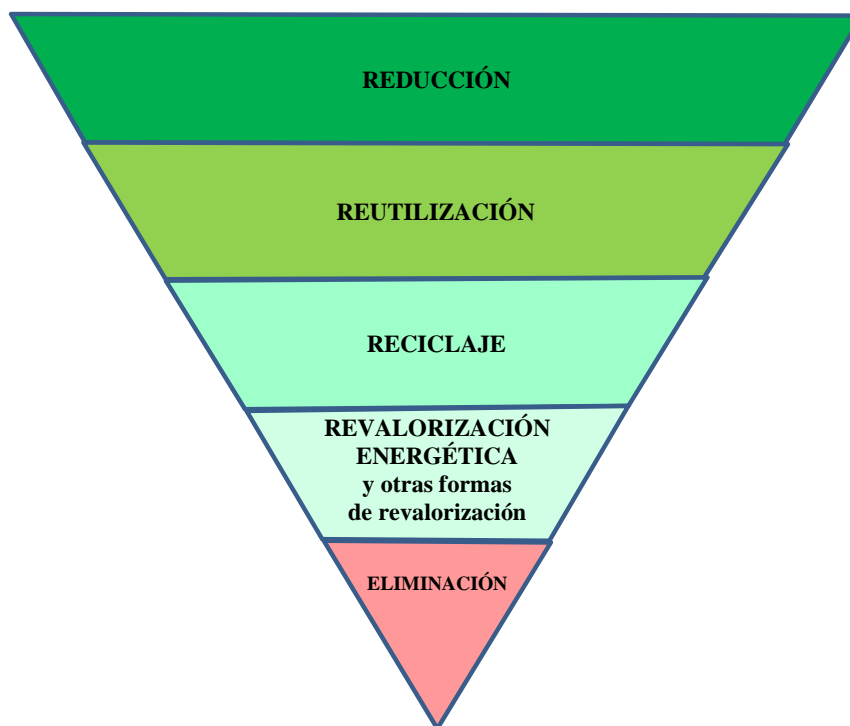


Figura 3.3.- Jerarquía de residuos. Fuente: Elaboración propia a partir de la Directiva Marco de Residuos (Unión Europea, 2008) y datos de la Comisión Europea (European Commission, 2011c).

Como última opción quedaría la eliminación mediante vertido o destrucción total o parcial.

Fracción a considerar	Reutilización	Reciclado	Otras formas de revalorización o valorización (fundamentalmente energética)
Productos cerámicos	x	x	
Hormigón		x	
Piedras		x	
Madera	x		x
Vidrio		x	
Plástico		x	x
Metales	x	x	
Papel y cartón		x	x
Yeso			x
Materiales bituminosos		x	

Tabla 3.4.- Destinos posibles de las fracciones de RCD. Fuente: Xunta de Galicia (2005).

Como se ha mencionado anteriormente (figura 3.1) los RCD presentan una composición heterogénea. Por tanto, no todas las alternativas de gestión que se acaban de ver son aplicables a cada uno de los materiales que forman este tipo de residuo. En la tabla 3.4 se indican los posibles destinos de las distintas fracciones de los RCD. Como puede verse en la tabla 3.4 las fracciones de hormigón y piedras, objeto de la presente tesis, no pueden reutilizarse (han sufrido un proceso de demolición), ni revalorizarse energéticamente (ni

las piedras ni el hormigón son combustibles). Por tanto, solo pueden reciclarse. Al ser reducidas sus opciones de valorización, se hace aún más necesario buscar nuevas alternativas de reciclado de este tipo de material.

Por otro lado, la correcta gestión de los RCD generados se realiza habitualmente mediante operaciones en los siguientes tipos de plantas (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009):

- Plantas de transferencia: en ellas tiene lugar el depósito temporal de RCD que han de ser eliminados o tratados en instalaciones localizadas a grandes distancias.
- Plantas de tratamiento: el fin último de estas plantas es escoger, ordenar y valorizar las diferentes fracciones que contienen los RCD. Así, se consiguen productos finales apropiados para su utilización directa, para un posterior tratamiento de valorización o reciclado o para su depósito en vertedero. Estas plantas pueden ser fijas (operan exclusivamente en el emplazamiento en que están ubicadas) o móviles (se desplazan temporalmente a las obras o a centros de valorización e eliminación para reciclar en origen).
- Vertederos controlados: en ellos tiene lugar el depósito definitivo de RCD. Deben cumplir con la legislación vigente al respecto.

Por tanto, el termino “gestión” aplicado a los RCD hace referencia a su tratamiento en cualquiera de estas plantas (transferencia, tratamiento o vertedero), pero evidentemente no incluye la eliminación de RCD en vertederos incontrolados. En la tabla 3.3 podían verse los datos de producción de RCD para el año 2006 en España. Del total de los 38,96 millones de toneladas de RCD producidos en el citado año, solamente un 40% fueron adecuadamente gestionados (GERD, 2007), es decir, o bien llevados a alguna de las plantas de transferencia o tratamiento o bien depositados en vertedero controlado. Esta cifra pone de manifiesto la existencia de numerosos vertederos incontrolados. Además únicamente fueron reciclados un 13,4% del total producido (GERD, 2007). Los datos disponibles más recientes indican que actualmente el reciclado de RCD en España se aproxima al 15% del total de RCD producidos; mientras que la media de la Unión Europea ronda el 45%, destacando países como Holanda o Alemania con porcentajes de reciclado próximos al 80% (GERD, 2010a). Si bien es cierto que los altos niveles de reciclaje de

algunos países pueden ser explicados no solo por el desarrollo y buen hacer de la industria del reciclaje a lo largo de tiempo sino también por la propia composición de los RCD en cada país (Fischer y Werger, 2009).

En este sentido, la Directiva Marco de Residuos (Unión Europea, 2008) establece que, antes del 2020, el 70% en peso de la fracción no peligrosa (excepto los residuos con código 17 05 04, tierra y piedras que no contienen sustancias peligrosas) de los RCD deberá emplearse en reutilización, reciclado y otras formas de valorización. Por su parte el PNIR establece que en el 2012 se deberá reciclar un 25% y en el 2015 un 35% (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, 2009). Como puede verse, son valores que se encuentran alejados del 15% actual.

3.5. ÁRIDOS Y MATERIALES RECICLADOS PROCEDENTES DE RCD

3.5.1. Generalidades

Tal y como se ha comentado anteriormente, en Europa y, concretamente, en España, existe una política con una clara tendencia a potenciar la reutilización y el reciclado de los RCD. Entre las diferentes opciones de gestión de este tipo de residuos, el reciclado es la opción preferente, pues, como se ilustra en la figura 3.4, la mayor parte de las fracciones contenidas en los RCD necesitan de tratamientos previos para obtener productos de calidad que puedan utilizarse de nuevo en obra (Gobierno Vasco, 2009).

Las fracciones de este tipo de residuos que son objeto de especial atención como material a ser reciclado son las formadas por hormigones, ladrillos, tejas, piedras, materiales cerámicos, asfaltos, etc. Estas fracciones representan alrededor del 70-80% del total de los RCD (figura 3.1) y se utilizan fundamentalmente para producir árido reciclado (AR). Por tanto, y tal y como se acaba de indicar, a través del reciclado de las fracciones mayoritarias de los RCD, aplicando las tecnologías existentes, se obtienen nuevos áridos, que reciben el nombre de áridos reciclados (ARs). Es decir, los ARs son el material granular que se obtiene a partir del tratamiento del material inorgánico presente en los RCD. Estos áridos deben cumplir con las especificaciones y requisitos técnicos de la normativa vigente al respecto para ser utilizados otra vez en el sector de la construcción.

También el reciclado de las fracciones minoritarias como los metales (que se utilizan como materia prima en la industria siderúrgica o en las fundiciones), la madera, el plástico, el papel y el cartón (que se utilizan como materia prima en el sector papelero) y el vidrio, alcanza cierta relevancia, sobre todo en los países en los que la gestión de residuos está más avanzada. Además de reciclarse, hay algunas de esas fracciones minoritarias que pueden revalorizarse energéticamente, como la madera, los textiles y el papel (Gómez-Limón et al., 2009). En España las fracciones minoritarias que pueden ser objeto de alguna de las formas de valorización suponen aproximadamente un 15% del residuo total (GERD, 2010a). El resto de componentes de los RCD, aproximadamente un 10% del residuo total (GERD, 2010a), se eliminan mediante su depósito en vertederos.

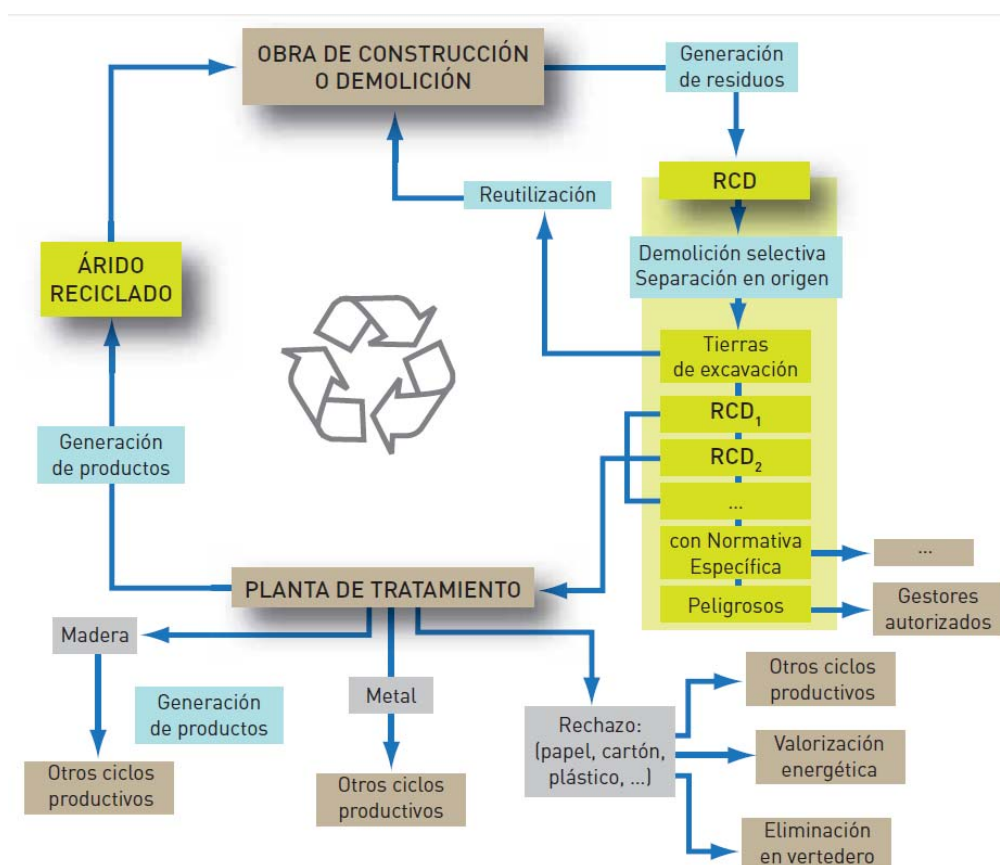


Figura 3.4.- Ciclo cerrado de los RCD. Fuente: Gobierno Vasco (2009).

3.5.2. Proceso de producción de los ARs

Como se ha comentado anteriormente, el principal producto obtenido como consecuencia de la valorización de los RCD son los ARs. Las características técnicas de los ARs van a depender del tipo de RCD de origen y del proceso de producción, incluyendo la intensidad

de la demolición selectiva en origen. Las plantas de tratamiento de RCD para obtener ARs son similares a las de tratamiento de áridos naturales, con la salvedad de que en los RCD hay elementos que deben ser eliminados. Así, en las plantas de tratamiento RCD se realizan las siguientes operaciones (Xunta de Galicia. Consellería de Presidencia, 2005):

- Recepción del material: el material es pesado y examinado visualmente para decidir si es apto o no y para comprobar que no presenta residuos peligrosos.
- Separación de residuos voluminosos, de gran tamaño, de forma manual o mecánica.
- Tamizado para la clasificación granulométrica de los residuos. Lo más recomendable es obtener tres fracciones: una fina (0-20 o 40 mm), una intermedia (20 o 40 – 60 u 80 mm) y una gruesa (mayor de 60 u 80 mm).
- Triaje manual: el residuo, tras la separación de voluminosos o tras el primer tamizado, va pasando por una cinta transportadora de banda ancha en la que los operarios escogen los materiales (de tamaños pequeños) que se van a separar (plásticos, maderas, papeles, cartones, metales) para depositarlos en su correspondiente contenedor y valorizarlos o eliminarlos posteriormente.
- Machaqueo para reducir el tamaño y separar algunos materiales tales como el acero del hormigón armado.
- Separación magnética: se eliminan los elementos férricos con un electroimán para su posterior valorización.
- Separación hidráulica y neumática para eliminar los elementos más ligeros (como plásticos o papeles) y limpiar el árido.

3.5.3. Tipos y aplicaciones de ARs de RCD en capas de firmes de carreteras

Ya se ha indicado con anterioridad que las propiedades de los ARs dependen de las características de los materiales de los que proceden, así como de la demolición selectiva y procedimiento de machaqueo, cribado y eliminación de impurezas al que hayan sido sometidos. Por tanto, para establecer recomendaciones sobre su uso lo que primero se plantea es la necesidad de su clasificación. Se indican a continuación, en función de su composición, los siguientes tipos de ARs (GERD, 2010a), con sus principales aplicaciones en capas de firmes de carreteras (FEHRL, 2005 y 2006; Vegas et al., 2008; GERD, 2010a):

- **ARs procedentes de hormigón** (figura 3.5a). Se obtienen principalmente de RCD de hormigón. Al ser los más estudiados presentan numerosas aplicaciones, destacando las bases y subbases para carreteras. Tanto granulares, que es la aplicación más común, como estabilizadas (ya sea con cemento o con algún tipo de ligante bituminoso). Este tipo de aplicación cuenta con una cierta experiencia práctica en la que destacan obras tales como la utilización de AR para fabricar zahorras y gravacemento en la conexión de la A-367 y la A-357 en Málaga, la ejecución de suelocemento en el ramal de acceso a la C-35 en Vidreres (Gerona), la fabricación de zahorra en un tramo de la Autovía Murcia-Albacete, etc. Al margen de su aplicación en capas de firmes de carreteras, este tipo de árido también se ha utilizado con éxito en la fabricación de hormigones y morteros y en la formación de predraplens y terraplens. En la presente tesis se estudia este tipo de árido. Cabe señalar que hay un tipo particular de AR de tipo hormigón, que no es objeto de la presente investigación. Se trata de los ARs procedentes exclusivamente de la demolición de estructuras en las que el único material de construcción interviniente es el hormigón. Destaca el ejemplo de los ARs procedentes de la demolición de pavimentos de hormigón, muy utilizados en los Estados Unidos.
- **ARs cerámicos** (figura 3.5b). Contienen como mínimo un 65% en peso de ladrillo y ladrillo silico-calcáreo, mezclados o no con hormigón. No tiene en principio aplicación en las capas de firmes de carreteras pues son utilizados fundamentalmente como material de relleno y en restauración de espacios degradados, en particular en espacios naturales afectados por actividades extractivas.
- **Áridos mixtos**. Constituidos por mezclas de RCD de hormigón y cerámicos fundamentalmente. Pueden utilizarse para subbases en caminos y viales, empleando como capa superficial zahorra reciclada. Además de utilizarse como material para fabricar capas de firme también se pueden utilizar para rellenos.

También hay otro tipo de AR procedente de RCD, muy habitualmente utilizado en lo que comúnmente se denomina reciclado de firmes: el **AR de aglomerado asfáltico** (figura 3.5c). También conocido como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) en la terminología anglosajona. Se obtiene a partir del material procedente del fresado de firmes asfálticos que han quedado en desuso. Cuenta con su mayor aplicación en bases y subbases de carreteras.



Figura 3.5.- Diferentes tipos de ARs procedentes de RCD: (a) de tipo hormigón, (b) cerámico y (c) de aglomerado asfáltico.

3.6. MARCO NORMATIVO, PLANES Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Desde la Unión Europea, los RCD son considerados como una corriente prioritaria dentro de los residuos, ya que presentan un elevado potencial de valorización (European Commission, 2011a). Por ello, tanto desde el ámbito europeo como desde el nacional, se utilizan medidas legislativas (Symonds et al., 1999) que fomentan la adecuada gestión de los RCD. Estas medidas pueden ser restricciones, prohibiciones o impuestos sobre el vertido, utilización de planes y controles medioambientales, medidas fiscales positivas o punitivas, etc. Esta tendencia se plasma en la abundante legislación comunitaria y nacional,

de aparición relativamente reciente. Destaca a nivel europeo la denominada Directiva Marco de Residuos, Directiva 2008/98/CE del Parlamento europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (D.O. L 312 de 22 de noviembre de 2008). A nivel nacional destacan la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados (B.O.E. nº 181 de 29 de julio de 2011) y el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (B.O.E. nº30 de 13 de febrero de 2008). En el Anexo 1 se lista la principal normativa comunitaria y estatal relativa a los RCD.

Ante el bajo porcentaje de reciclado en España anteriormente comentado, un 15%, desde el ámbito político se trata de fomentar la reutilización y el reciclado frente a la tendencia generalizada del vertido de RCD, que tal y como se ha visto es, en muchas ocasiones, incontrolado. Para ello, desde el ámbito nacional también se han elaborado planes nacionales de residuos. El primero de ellos fue el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006, que fue puesto al día e incorporado al actualmente vigente Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015. Se fijan aquí los objetivos de prevención, reutilización, reciclaje y otras formas de valorización, así como el esbozo de las medidas para alcanzarlos.

También existe una extensa legislación autonómica al respecto, destacando en Galicia la Lei 10/2008, do 3 de novembro, de residuos de Galicia (D.O.G. nº 224, de 3.11.2008) y el Decreto 174/2005, de 9 de julio, que regula el régimen jurídico de la producción y gestión de residuos y el Registro General de Productores y Gestores de residuos de Galicia (D.O.G. nº 124, de 29.06.2005).

Por último, las condiciones a que se someterán la generación y gestión de los RCD que pertenezcan al ámbito de las Entidades locales se establecen mediante las respectivas Ordenanzas, tal y como se indica en la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados.

Por otro lado, con el fin de garantizar que los productos de construcción se comercialicen solo si presentan las características de calidad idóneas para su uso, la Directiva de Productos de Construcción (Unión Europea, 1989) modificada por la Directiva 93/68/CEE (Unión Europea, 1993) indica que deben llevar el marcado “CE”. La trasposición de estas directivas al derecho nacional se ha llevado a cabo mediante el Real Decreto 1630/1992 (B.O.E. nº34 de 9 de febrero de 1993), modificado por el Real Decreto 1328/1995 (B.O.E.

nº198 de 19 de agosto de 1995. Corrección de errores B.O.E. nº240 de 7 de octubre de 1995.). El marcado “CE”, exigible desde el 1 de junio de 2004, es, por tanto, un requisito obligatorio para la comercialización de productos de construcción a nivel nacional y europeo, incluidos los áridos. El marcado “CE” garantiza el cumplimiento de las “normas armonizadas”. En el caso de los áridos para mezclas bituminosas la “norma armonizada” en vigor es la UNE-EN 13043 “Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas” (AENOR, 2004b). La citada norma define árido reciclado como el “*resultante del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado en la construcción*” e indica lo siguiente en su primer apartado:

“Los áridos usados en construcción deberían cumplir con todos los requisitos de esta norma europea.”

Por otro lado, el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015 indica que es fundamental fomentar y facilitar la utilización de AR. Para ello, es preciso desarrollar normativa con condiciones de tipo técnico y ambiental que debe incorporarse a los pliegos de las obras.

A pesar de lo indicado en el PNIR, en el momento de redacción de la presente tesis no existía ni a nivel autonómico ni a nivel nacional ningún tipo de normativa específica reguladora del empleo de ARs procedentes de RCD en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Aunque sí se ha encontrado la siguiente mención dentro de los artículos 542 (Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso) y 543 (Mezclas bituminosas para capa de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas) del “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes”, en adelante PG-3 (Ministerio de Fomento, 2008):

“El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o en su defecto, el Director de las Obras, podrá exigir propiedades o especificaciones adicionales cuando se vayan a emplear áridos cuya naturaleza o procedencia así lo requiriese.”

Es decir, tanto las normas armonizadas europeas como el PG-3 permiten el uso de ARs procedentes de RCD en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Además, el PNIR anima a la creación de un cuerpo normativo para fomentar el uso de los ARs. Aún así, hasta la fecha, no hay especificaciones propias para este tipo de ARs en la fabricación de mezclas bituminosas. Por tanto, los ARs deberán cumplir con las mismas

especificaciones que las indicadas para el árido natural y todas aquellas adicionales que o bien se indiquen en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o bien las exija el Director de las Obras. La utilización de RCD como AR para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente es un campo relativamente nuevo, de ahí la falta de normativa técnica al respecto.

En cambio, para la fabricación de hormigones existe un mayor campo normativo. De hecho, la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-2008) permite utilizar AR tanto para fabricar hormigón estructural como no estructural, en porcentajes de sustitución máximos del 20% y del 100% de la fracción gruesa (> 4 mm) respectivamente (GERD, 2010b).

También cabe citar que el PG-3 ya considera el uso de este tipo de AR en otras capas de firmes, como en las zahorras (para categorías de tráfico bajas, de T2 a T4, y siempre y cuando cumplan con las especificaciones del PG-3 para todos los tipos de áridos) y el suelocemento y la gravacemento (para categorías de tráfico medias, T1 y T2 y con prescripciones adicionales).

Capítulo 4

LA UTILIZACIÓN DE ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD EN MEZCLAS BITUMINOSAS

4.1. INTRODUCCIÓN

La utilización de áridos reciclados (ARs) procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) en el sector de la construcción ha experimentado un desarrollo creciente en los últimos años (Alaejos Gutiérrez y Calvo Calzada, 2010). Sin embargo, todavía se necesita una mayor investigación para poder diversificar sus aplicaciones y hacer que su empleo deje de ser novedoso y pase a ser una práctica habitual.

Como se ha comentado en el capítulo anterior, en la presente tesis se investiga con AR de tipo hormigón procedente de RCD. En el caso de su utilización para capas de firmes, cabe mencionar que la mayor parte de las investigaciones realizadas se centran en el uso de los mismos en las capas de base y subbase, aunque también se ha encontrado alguna mención a su utilización como tratamiento superficial (GERD, 2010b). Esto se debe fundamentalmente a que las capas de base y subbase consumen una mayor cantidad de áridos que las capas de rodadura e intermedia (Huang et al., 2007). Además, en las capas inferiores del firme las exigencias técnicas son menores que en las capas superiores.

En este sentido, se han llevado a cabo investigaciones sobre la utilización de ARs de tipo hormigón como materiales granulares (Bennert et al., 2000; Arm, 2001; Poon y Chan, 2006; Vegas, et al, 2008; Jiménez et al., 2011; Vegas, et al., 2011;) y como materiales tratados con conglomerantes hidráulicos (Yeo y Sharp, 1997; Rakshvir y Barai, 2006).

Además, cabe comentar que existen experiencias, tanto en España como a nivel mundial, de empleo exitoso de este tipo de AR como capa granular y capa tratada con cemento en firmes de carreteras. Ya solo en nuestro país se pueden enumerar diversos ejemplos (Alaejos Gutiérrez y Calvo Calzada, 2010) como la segunda fase del Anillo Verde Ciclista de Madrid (en el que se utilizó el AR como zahorra artificial para 15 km carril bici), la conexión de la A-367 con la A-357 en Málaga (en la que se utilizó AR para fabricar tanto zahorra como gravacemento), etc.

Por otro lado, fuera de nuestro país también hay investigaciones sobre el empleo de otros tipos de ARs procedentes de RCD. Así, se investigó sobre la posible utilización de AR de tipo cerámico, procedente del machaqueo de ladrillos, para la fabricación de macadam bituminoso en caliente y en frío (Sobhan y Zakaria, 2001; Ellis et al., 2004), y mezclas

bituminosas en caliente (Khalaf, 2004). También cabe citar el empleo de AR de tipo hormigón en ladrillos cohesionados con betún (Thanaya, 2009).

Pero, hasta la fecha, como se verá en los apartados 4.3, 4.4 y 4.5, un limitado número de investigaciones han sido realizadas sobre el uso de AR de tipo hormigón procedente de RCD en mezclas bituminosas en caliente. Más limitado es aún el número de obras que se han llevado a cabo. Ciertamente, solo se ha encontrado información sobre mezclas bituminosas en caliente fabricadas con un tipo particular de AR de tipo hormigón procedente de RCD. Se trata de AR obtenido a partir de la trituración de escombros procedentes de la demolición de pavimentos de hormigón u otras estructuras formadas exclusivamente por hormigón (ej: pilas de viaductos, etc). Es decir, solo se han encontrado casos reales para un tipo específico de AR de tipo hormigón, diferente del utilizado en la presente tesis. En la terminología anglosajona a este tipo de AR se le denomina habitualmente *Crushed Concrete Aggregates* (CCA).

Por un lado, según un estudio realizado por la Federal Highway Administration (FHWA, 2004b) en los Estados Unidos la utilización de CCA en mezclas bituminosas en caliente, no es ampliamente aceptada. A pesar de ello, hasta un total de 8 estados contemplan en su normativa técnica su empleo: Florida, Illinois, Luisiana, Michigan, Minnesota, Misisipi, Virginia y Utah. No obstante, aunque en estos estados está permitido el empleo de CCA en mezclas bituminosas, su utilización, como se ha dicho, no es habitual. El estado del que más información se ha obtenido es el de Michigan (MDOT, 2011). Las especificaciones técnicas para mezclas convencionales de Michigan permiten el empleo de CCA en mezclas bituminosas en caliente, aunque, como ya se ha indicado, no se suelen utilizar (MDOT, 2011). Así, se contempla su utilización en la fracción gruesa, siempre y cuando los CCA cumplan las especificaciones técnicas relativas a los áridos naturales y produzcan mezclas bituminosas que superen los estándares exigidos a las mezclas convencionales (MDOT, 2011).

A modo de ejemplo, entre 1986 y 1987 se construyó en Illinois un tramo de prueba en el que se utilizaba CCA en la capa bituminosa intermedia (Schutzbach, 1992). Se construyeron tres secciones: una con un 100% de árido virgen, otra con un 50% de CCA y otra con un 100% de CCA. Las mezclas bituminosas en las que intervino el CCA

mostraron un comportamiento igual o superior al mostrado por las mezclas fabricadas íntegramente por árido virgen (Schutzbach, 1992).

En Hempstead (New York) también se construyeron dos tramos de prueba (Petrarca y Galdiero, 1984); uno en 1981 (Abbey Lane) y otro en 1983 (Blacksmith Lane). Para ambos tramos de prueba se dosificó en laboratorio una mezcla para capa de base fabricada con un 100% de CCA y se comparó con una mezcla de control en la que el 100% del árido era natural. Del ensayo Marshall realizado (según la norma ASTM C1559), se pudo concluir lo siguiente: la mezcla con un 100% de CCA tenía una estabilidad Marshall un 60% más elevada que la mezcla de control; además la mezcla con CCA era un 16% menos densa para el primer tramo y un 11,5% menos densa para el segundo; respecto al óptimo de ligante, para la mezcla de control se obtuvo un 5,0% y para la mezcla con CCA, se obtuvo un 5,5% para el primer tramo y un 5,7% para el segundo. Es decir, se obtuvo un contenido óptimo de ligante más elevado para la mezcla con CCA. A pesar de que el óptimo era más elevado, puesto que la mezcla con CCA era un 16% o un 11,5% menos densa que la de control, Petrarca y Galdiero (1984) concluyeron que tenía un enorme potencial económico: para el mismo espesor podrían disponer un 16% o un 11,5% menos de toneladas de mezcla bituminosa. Tras la construcción de los tramos de prueba se hicieron mediciones de las deflexiones con Viga Benkelman. Con los resultados de la campaña de campo se pudo constatar el buen comportamiento de las mezclas fabricadas con CCA; mejor que el de las convencionales.

Por otro lado, el estudio de la Federal Highway Administration (FHWA) mencionado anteriormente también indica que dada la mayor demanda de ligante de este tipo de áridos, como consecuencia de su elevada absorción (Anónimo, 1984; FHWA, 2004b), su utilización en las mezclas bituminosas no parece tener un futuro prometedor (FHWA, 2004b). No obstante, es preciso considerar que si bien es cierto que existe un aumento de costes derivados del mayor consumo de ligante, también habría que tener en cuenta la reducción en los costes medioambientales (reducción en el consumo de materias primas, menor volumen de RCD en vertederos, etc). Y por supuesto, recalcar lo indicado por Petrarca y Galdiero (1984): al ser menor la densidad de la mezcla fabricada con AR, también será menor la masa de mezcla bituminosa a disponer para un mismo espesor de mezcla convencional. Esto podría llegar a compensar el incremento en el contenido óptimo de ligante de las mezclas fabricadas con AR.

En este capítulo se lleva a cabo una revisión bibliográfica sobre la utilización de AR de tipo hormigón procedente de RCD en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. En primer lugar se describen las principales propiedades de los ARs, contrastándolas con las de los áridos naturales. A continuación se ve cómo afecta la utilización de este tipo de AR en las características de las mezclas bituminosas y los principales tratamientos aplicados para mejorar su comportamiento.

4.2. PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS DE TIPO HORMIGÓN

Como se puede apreciar en la figura 4.1 el AR de tipo hormigón procedente de RCD se diferencia principalmente de los áridos naturales en que el AR presenta mortero adherido en su superficie (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009).

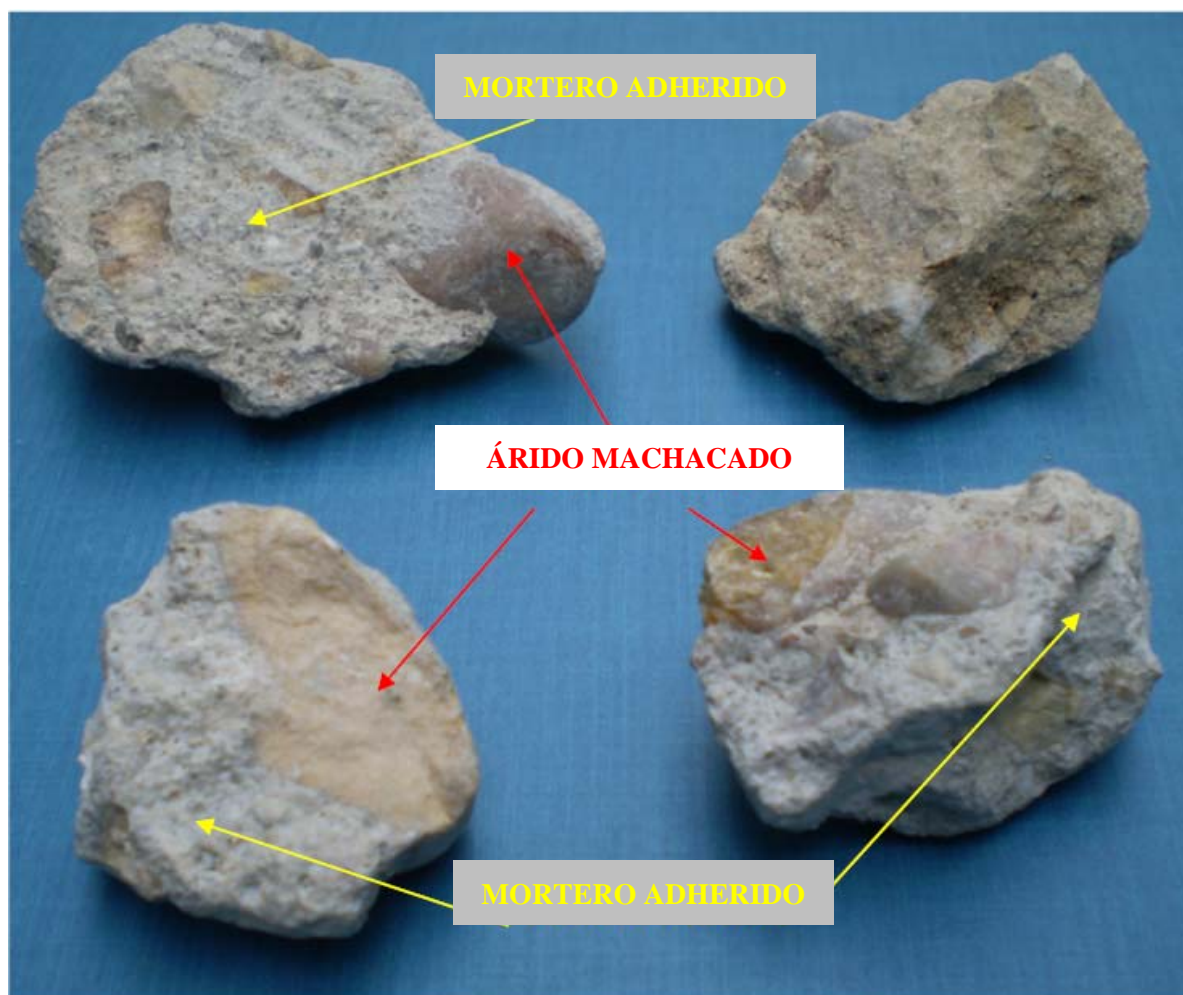


Figura 4.1.- Detalle del mortero adherido en el AR. Fuente: Pérez et al. (2012b).

La presencia de mortero, más poroso y menos denso que el árido natural original, parece ser la principal responsable de la pérdida de calidad del AR (Paranavithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Tam et al., 2007; Gul, 2008; Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009); pero no es la única. Algunos de los estudios llevados a cabo indican que para poder utilizar AR en la fabricación de mezclas bituminosas es preciso tratarlos con el fin de mejorar su heterogeneidad y eliminar impurezas presentes en el mismo tales como metales, plásticos, papeles, madera, yeso, etc. (Cupo-Pagano et al., 1994; Paranavithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b). En las figuras 4.2 y 4.3 pueden verse algunas de las impurezas que habitualmente se encuentran en los ARs de tipo hormigón.



Figura 4.2.- Detalle de las impurezas de yeso presentes en el AR. Fuente: elaboración propia (Laboratorio de Caminos de la Universidade da Coruña).



Figura 4.3.- Detalle de las impurezas flotantes presentes en una muestra de AR sumergida en agua. Fuente: elaboración propia (Laboratorio de Caminos de la Universidade da Coruña).

Otros estudios (Tam et al., 2007) indican que la debilidad del contacto entre el árido natural y el mortero de cemento también es responsable de esta pérdida de propiedades; mientras que otros investigadores (Lee et al., 2012) indican que las pequeñas fisuras que aparecen como consecuencia del proceso de machaqueo al que son sometidos los RCD para obtener AR contribuyen así mismo a empeorar sus propiedades. Por todo ello, los ARs procedentes de RCD tienen generalmente una calidad inferior a la de los áridos naturales (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009; Lee et al., 2012).

A todo ello hay que añadir que la calidad del AR es muy variable, al igual que lo es su composición, pues depende de la obra que se haya demolido para su obtención, del proceso de fabricación, etc. Por eso los diferentes ARs suelen presentar heterogeneidades en su calidad (Paranavithana et al., 2006; Gul, 2008). No obstante, los ARs de tipo hormigón procedentes de RCD presentan una serie de características comunes con las cuales coinciden la mayor parte de los autores y que se detallan en los siguientes apartados.

Se ha considerado oportuno, incluir también las referencias bibliográficas relativas a ARs de tipo hormigón procedentes de la demolición de estructuras de hormigón. Aunque no son objeto de la presente tesis, pues son un caso particular del AR utilizado, presentan similitudes que son de interés de cara a la investigación realizada.

4.2.1. Granulometría y estabilidad granulométrica

La granulometría de los ARs es función del proceso de machaqueo (Rueda Páramo, 2011). En el AR obtenido tras la trituración se puede encontrar tanto árido grueso como árido fino (figura 4.4). La fracción gruesa (≥ 4 mm) posee una granulometría apta para la práctica totalidad de las aplicaciones que se le puede dar al AR como material granular en el sector de la construcción (CEDEX, 2010). Su contenido varía entre un 70% y un 90% de la masa total del hormigón de origen (CEDEX, 2010), en función tanto del tamaño máximo del AR como de la composición del RCD de origen (Rueda Páramo, 2011). Cabe señalar que en un estudio llevado a cabo en 74 plantas de reciclaje en España entre los años 2009 y 2010 (GERD, 2010b) se obtuvo que la media de las granulometrías de los áridos reciclados se encontraba dentro de los husos especificados por el PG-3 para la zahorra artificial (ZA25 y ZA20), aunque en general el porcentaje de polvo mineral era excesivo, debiendo ser corregido en planta.



Figura 4.4.- Fracciones granulométricas del AR: (a) Fracción gruesa y (b) Fracción fina. Fuente: FHWA (2004b).

Es preciso señalar que algunas investigaciones (Paranavithana et al., 2006; Gul, 2008) han constatado el cambio en la distribución granulométrica de las mezclas bituminosas fabricadas con AR tras la mezcla y compactación de la misma, atribuyendo este hecho a la debilidad del mortero de cemento adherido. Otros autores también responsabilizan a los restos de cerámica y ladrillos presentes en el AR (Muniz de Farias et al., 2012). Además, aunque la composición del AR tiene influencia en la inestabilidad granulométrica, puede haber otros factores de importancia. Muniz de Farias et al. (2012) destacan entre estos factores: la granulometría inicial de la mezcla, la energía de compactación y el contenido de agua. Arabani y Azarhoosh (2012) incluso afirman que la utilización de AR en la fracción gruesa afecta a las propiedades mecánicas de la mezcla como consecuencia de que las operaciones de mezclado y compactación alteran el tamaño del árido y separan el mortero adherido.

Hay algunas investigaciones que analizan el fenómeno de la inestabilidad granulométrica de los ARs. Así, Cho et al. (2011) dosificaron cuatro mezclas bituminosas para capa de base mediante el método Superpave: mezcla I (100% árido natural), mezcla II (AR en la fracción fina y natural en la gruesa), mezcla III (AR en la fracción gruesa y natural en la fina) y mezcla IV (100% AR). Para ello fabricaron probetas de 150 mm de diámetro y 170 mm de altura y las compactaron con el compactador giratorio tras cuatro horas de envejecimiento. De las probetas así fabricadas extrajeron testigos de 100 mm de diámetro. La dosificación del contenido óptimo de ligante se obtuvo para un contenido del 5% de

huecos de aire en los testigos extraídos de las probetas. Una vez obtenido el contenido óptimo de ligante, también fabricaron probetas cilíndricas siguiendo el método Marshall. En este caso no dosificaron de nuevo las mezclas, sino que las fabricaron utilizando el contenido de ligante óptimo obtenido mediante el método Superpave. Además, durante la aplicación del método Marshall no sometieron a las probetas al envejecimiento indicado anteriormente. Pudieron comprobar que las probetas Marshall de las mezclas III y IV (AR en la fracción gruesa) presentaban menores huecos en mezcla que las probetas Marshall de las mezclas I y II (árido natural en la fracción gruesa). Esta tendencia no se cumplía para la compactación mediante el compactador giratorio (Superpave). A raíz de los resultados obtenidos, Cho et al. (2011) afirmaron que el método Marshall de compactación no es adecuado para mezclas fabricadas con AR, ya que los impactos que se producen durante la compactación pueden producir la rotura de la fracción gruesa del AR y, por tanto, conducir a resultados inesperados.

En otra investigación, Muniz de Farias et al. (2012) analizaron la utilización de betunes modificados con polvo de neumáticos fuera de uso (NFU) para solventar el problema de la inestabilidad granulométrica de las mezclas bituminosas fabricadas con AR. En la investigación obtuvieron el índice de degradación Marshall para una mezcla bituminosa (ID_{ML}):

$$ID_{ML} = \frac{1}{6} \left(\sum_{i=1}^6 D_i \right) \quad (4.1)$$

donde:

D_i = diferencia entre el porcentaje de árido que pasa por un tamiz determinado antes y después de compactar. Se utilizaron los tamices de 25,4 mm, 12,5 mm, 9,5 mm, 4,75 mm, 0,425 mm y 0,075 mm.

Fabricaron una mezcla bituminosa densa para capa de rodadura con AR procedente de la demolición de un estadio de Brasil y un 6% de betún de penetración 50/70. El betún estaba modificado con un 0%, un 10% y un 20% de NFU en peso. Compararon los resultados con los obtenidos para una mezcla igual, pero sin betún. Para la compactación utilizaron el

procedimiento Marshall convencional, con 35, 50 y 75 golpes por cara. Las granulometrías de las mezclas se obtuvieron tras la centrifugación de las probetas en disolvente orgánico.

Como puede verse en la tabla 4.1, por un lado, llegaron a la conclusión de que, puesto que el índice de degradación aumentaba con el número de golpes empleado en la compactación, la fragmentación era mayor cuanto mayor era la energía de compactación. Por otro lado, los resultados mostraron como al cohesionar con betún la mezcla de áridos, su índice de degradación es menor. Por tanto, al cohesionar con betún se reducía la fragmentación de las partículas. Además, esta reducción era mayor cuanto mayor era la cantidad de polvo de neumático presente en el betún. Muniz de Farias et al. (2012) indicaron que esto era así debido al comportamiento elástico de las partículas de caucho.

Características de la mezcla		Golpes con maza Marshall		
% B50/70	% NFU	35	50	75
0	0	6,98	7,81	8,59
6	0	5,69	6,39	6,47
6	10	5,94	6,07	6,15
6	20	5,63	5,69	5,05

Tabla 4.1.- Índice de degradación Marshall. Fuente: Muniz de Farias et al. (2012).

4.2.2. Propiedades mecánicas y físicas

4.2.2.1. Resistencia a la fragmentación. Coeficiente de Los Ángeles

Como es sabido, es importante que un árido presente una elevada resistencia a la fragmentación para poder soportar las cargas de tráfico sin resquebrajarse. El Coeficiente de Los Ángeles (LA) es una medida de la resistencia a la fragmentación de los áridos: cuanto menor es el LA de un árido, mayor es su resistencia a la fragmentación. El LA de los ARs (tabla 4.2) varía dentro de un amplio rango. Oscila entre un 25% y un 45% en función de parámetros tales como el tamaño de las partículas, la calidad del hormigón de origen y el propio LA del árido natural original (Rueda Páramo, 2011). Como puede verse en algunos de los ejemplos de la tabla 4.2, los ARs presentan un LA mayor (Shen y Du, 2004 y 2005; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Rafi et al., 2011) y, por tanto, una menor resistencia a la fragmentación que los áridos naturales. Esto es debido principalmente a que durante la realización del ensayo de Los Ángeles el mortero adherido presente en el AR se fragmenta fácilmente. Por tanto, a medida que aumenta el contenido de mortero también aumenta el LA (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009), ya que a

la pérdida de peso propia del árido natural original en este ensayo habría que añadir la pérdida de peso debida a la desintegración del mortero.

Referencia de la investigación	LA (%)	
	AR	Árido natural
Pérez et al. (2007)	39,65	19,4 a 22,1
Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez (2009)	35 a 42%	-
Rafi et al. (2011)	36,88	27,21
Jiménez et al. (2011)	33 a 34	-

Tabla 4.2.- Coeficiente de Los Ángeles de diferentes ARs procedentes de RCD y áridos naturales.

La naturaleza porosa del mortero adherido, su menor resistencia y la presencia de grietas en el mismo son las principales razones por las cuales el mortero se pulveriza durante la realización del ensayo de Los Ángeles (Jiménez et al., 2011; Rueda Páramo, 2011).

4.2.2.2. Densidad de las partículas y absorción de agua

Como se puede ver en la tabla 4.3, los ARs procedentes de RCD son menos densos que los naturales (Cupo-Pagano et al., 1994; Shen y Du, 2004 y 2005; Parनावithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Wong et al., 2007; Cho et al., 2011; Rafi et al., 2011). En general se obtienen valores de densidad entre un 5% y un 10% inferiores a los de los áridos naturales (CEDEX, 2010). Por tanto, las mezclas bituminosas fabricadas con este tipo de áridos reciclados también tendrán densidades inferiores a las de las mezclas convencionales.

Referencia de la investigación	Densidad de las partículas (g/cm ³)	
	AR	Árido natural
Shen y Du (2004)	2,202 (grueso) – 1,870 (fino)	2,655 (grueso) – 2,516 (fino)
Rafi et al. (2011)	2,187	2,452
Pérez et al. (2012b)	2,630 (en aceite de parafina)	2,680 a 2,760 (en aceite de parafina)

Tabla 4.3.- Valores de densidad de las partículas de diferentes ARs procedentes de RCD y áridos naturales.

Está demostrado (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009) que cuanto mayor es el contenido de mortero adherido, menor será la densidad (figura 4.5). Por ello, las diferencias entre las densidades del AR y del árido natural son más acusadas en las fracciones más finas, ya que estas últimas presentan un mayor contenido de mortero (CEDEX, 2010).

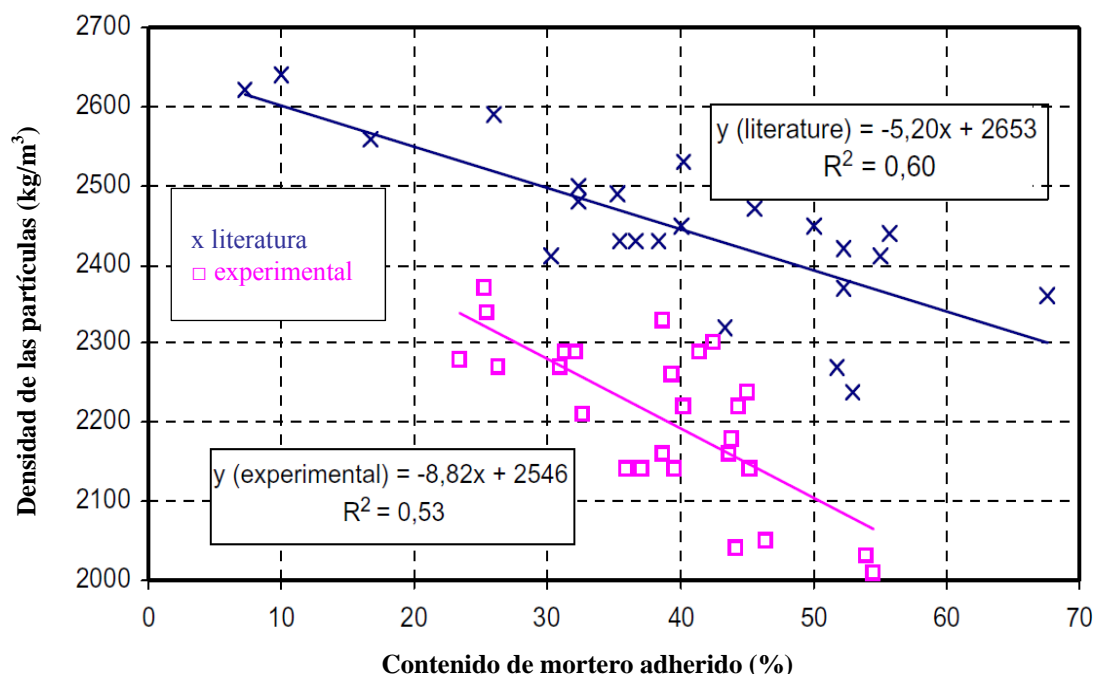


Figura 4.5.- Densidad de las partículas del AR en función del contenido de mortero adherido. Fuente: Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez (2009).

Tal y como se ilustra en la tabla 4.4, una de las diferencias más acusadas entre los ARs y los áridos naturales se encuentra en su absorción de agua (CEDEX, 2010). Esta propiedad también está directamente relacionada con el contenido de mortero adherido, de tal forma que, como se puede ver en la figura 4.6, a mayor contenido de mortero mayor absorción (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009). Puesto que la fracción fina tiene un mayor contenido de mortero que la gruesa (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009), también presenta una mayor absorción de agua que la fracción gruesa.

Referencia de la investigación	Absorción de agua (%)	
	AR	Árido natural
Shen y Du (2004)	8,8	0,6
Rafi et al. (2011)	4,57	1,09

Tabla 4.4.- Absorción de agua de diferentes ARs procedentes de RCD y áridos naturales.

Por tanto, los ARs presentan una mayor absorción de agua que los naturales (Shen y Du, 2004 y 2005; Paravithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Gul, 2008; Cho et al., 2011; Rafi et al., 2011). En este sentido, es previsible que las mezclas bituminosas fabricadas con AR sean más susceptibles a la acción de agua que las convencionales. El valor de la absorción es función de la composición del AR, al igual que

la densidad (Rueda Páramo, 2011). Lo más habitual es obtener valores comprendidos entre el 4% y el 9% o incluso algo superiores, entre el 5 y el 15%, en el caso de que se trate de arenas recicladas (CEDEX, 2010).

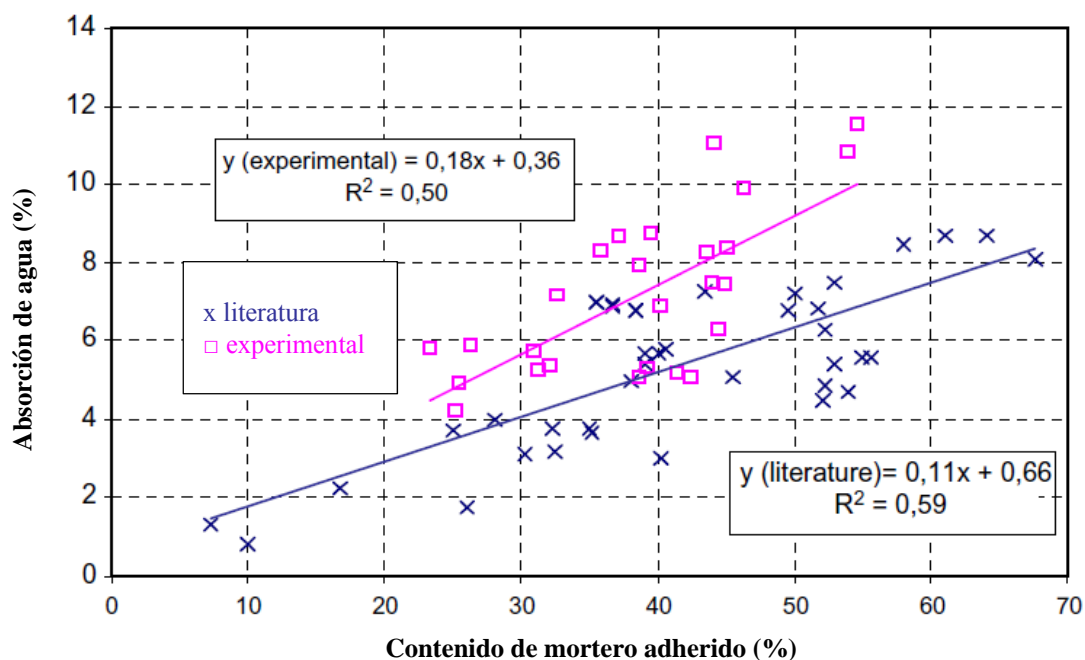


Figura 4.6.- Absorción de agua del AR en función del contenido de mortero adherido. Fuente: Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez (2009).

El mortero adherido presente en el AR es un material poroso (Paranavithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009). Por ello los ARs no solo presentan, como se acaba de ver, una menor densidad y una mayor absorción de agua, sino que también son más porosos (Paranavithana et al., 2006) y presentan una mayor permeabilidad (Gul, 2008).

4.2.3. Propiedades geométricas

4.2.3.1. Forma de las partículas. Índice de lajas

Las partículas lajosas presentan un mayor riesgo de rotura cuando están sometidas a los esfuerzos provocados por las cargas del tráfico, por lo que su contenido debe limitarse. Como es sabido, el equipo que se utiliza para el machaqueo condiciona la forma tanto de los áridos naturales como de los ARs. En este sentido se ha comprobado que los molinos de impactos tienden a formar áridos de forma cúbica (GERD, 2010a). Además también se ha visto que el hormigón suele romper en bloques pequeños, lo que hace que apenas se

generen lajas (GERD, 2010a). En general los ARs presentan un índice de lajas menor que los áridos naturales (CEDEX, 2010), comprendido entre el 5% y el 9% (GERD, 2010a). Es decir, presentan una menor proporción de partículas lajosas. Este hecho puede deberse, además de a las razones indicadas anteriormente, a que el mortero adherido tiende a aumentar el espesor de los áridos lajosos (Rueda Páramo, 2011). Esto es acorde con las investigaciones realizadas hasta la fecha que concluyen que los ARs cumplen con las especificaciones sobre índice de lajas para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente (Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Mills-Beale y You, 2010).

4.2.3.2. Porcentaje de caras de fractura del árido grueso

Es deseable que un árido presente caras de fractura, ya que éstas mejoran la resistencia de la capa de firme debida al rozamiento interno del árido. En general, los ARs son angulosos como consecuencia del proceso de machaqueo al que son sometidos durante su fabricación (Adams, 2012), por lo que también presentan un elevado porcentaje de caras de fractura. Las investigaciones realizadas hasta la fecha concluyen que los ARs de tipo hormigón cumplen con las especificaciones sobre caras de fractura para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente (Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Mills-Beale y You, 2010; Bushal et al., 2011).

4.2.3.3. Textura

La rugosidad e irregularidades de la superficie de los áridos se engloban bajo el término textura (NCHRP, 2008). Los ARs son más rugosos que los naturales (Shen y Du, 2004 y 2005), debido a la presencia de mortero adherido. Como consecuencia de ello aportarán un mayor rozamiento interno aunque también presentarán una mayor dificultad para llevar a cabo su envuelta con el ligante.

Observaciones mediante microscopio electrónico de barrido del polvo mineral procedente de RCD, destacan su mayor rugosidad frente al polvo mineral calizo comercial (Chen et al., 2011). Así, en la figura 4.7a puede verse una imagen ampliada de una partícula de polvo mineral procedente de RCD, en la que puede apreciarse la textura rugosa del mismo frente a la del polvo mineral calizo comercial (figura 4.7b).

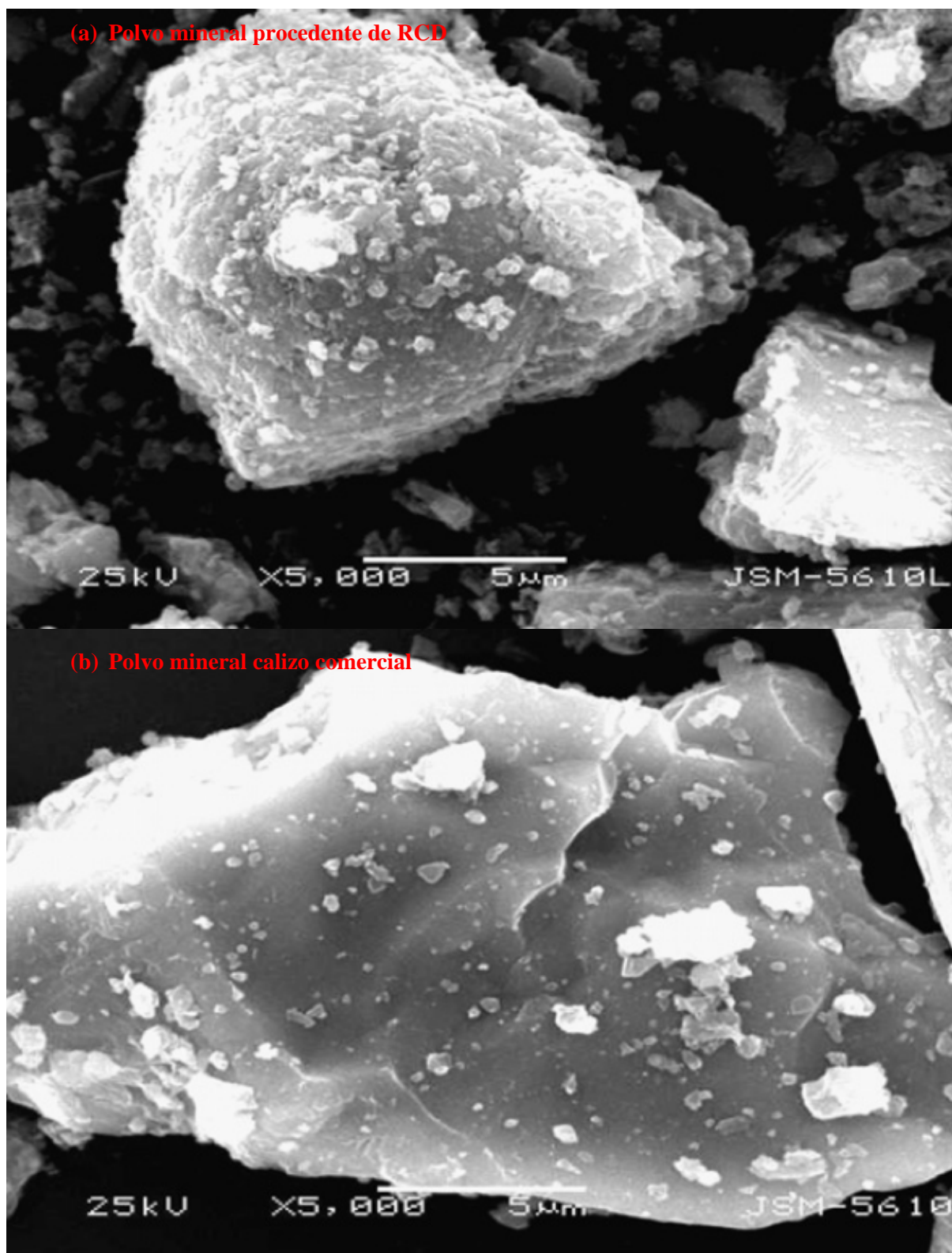


Figura 4.7.- Imagen tomada con microscopio electrónico de barrido de distintos polvos minerales: (a) Polvo mineral procedente de RCD y (b) Polvo mineral calizo comercial. Fuente: Chen et al. (2011).

4.2.3.4. Evaluación de la limpieza de los finos. Equivalente de arena

Como es sabido, un equivalente de arena muy bajo indica que el árido está muy contaminado. Es decir, que se trata de un árido con una elevada presencia de finos plásticos, por lo que no debe emplearse para capas de firmes, ya que podría afectar a su resistencia y durabilidad. Los finos arcillosos pueden comprometer la adherencia del árido con el ligante e incluso ser expansivos. Además, en presencia de agua pueden dar lugar a pérdidas de rozamiento interno.

Mediante un adecuado proceso de producción, en los ARs que presentan granulometrías continuas, la fracción fina está formada exclusivamente por hormigón, por lo que se obtienen valores del equivalente de arena altos, así como áridos no plásticos (GERD, 2010a). En este sentido, las investigaciones realizadas señalan que los ARs cumplen con las especificaciones relativas al equivalente de arena (figura 4.8) para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente (Pérez et al., 2007, 2011, 2012a y 2012b).

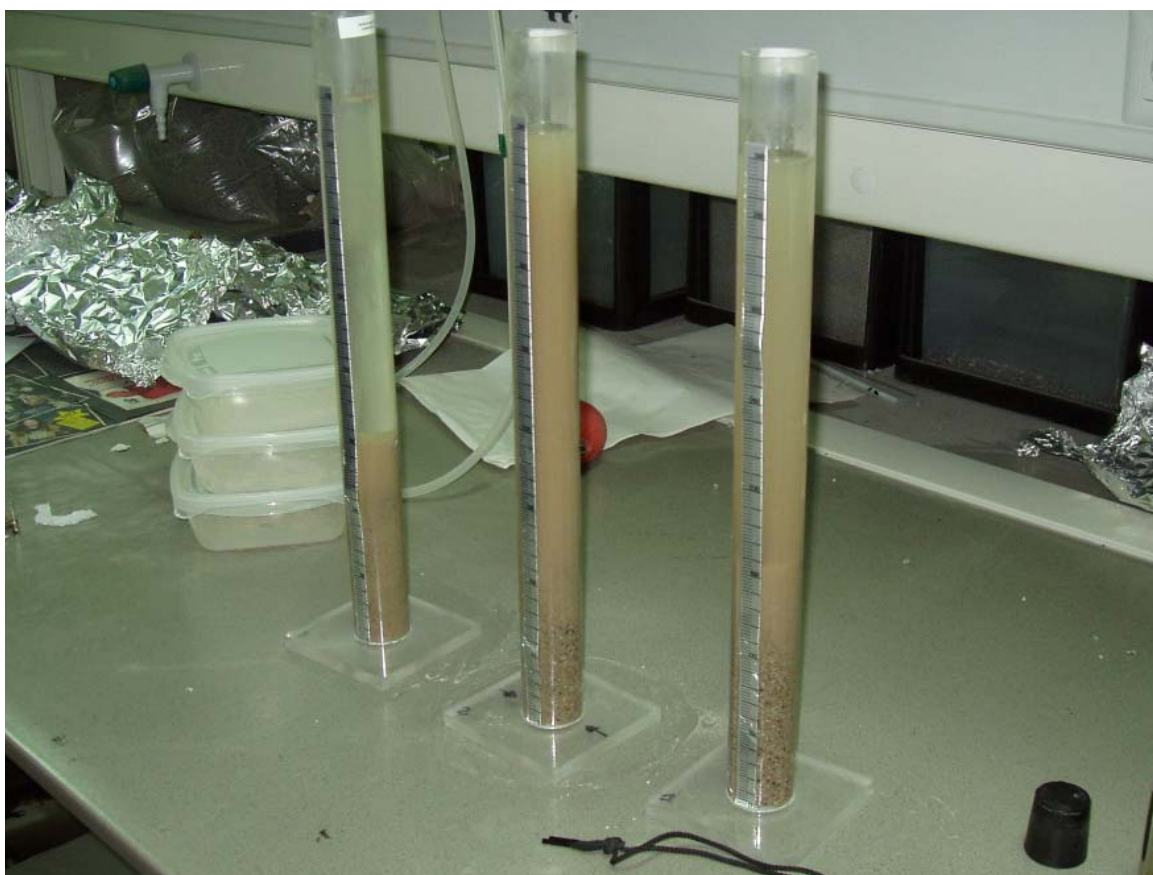


Figura 4.8.- Realización del ensayo del equivalente de arena a ARs procedentes de RCD. Fuente: elaboración propia (Laboratorio de Caminos de la Universidade da Coruña).

4.2.3.5. Composición del árido reciclado

Jiménez et al. (2011) estudiaron tres tipos de AR de hormigón procedentes de RCD. Llegaron a la conclusión de que éstos son muy puros, pues más del 96% de las partículas son de hormigón (entre un 71% y un 76% son áridos con mortero adherido y entre un 20% y un 25% son áridos sin mortero adherido). Los restantes componentes se puede considerar que son impurezas. Así habría entre un 1,6% y un 3,5% de material cerámico, entre un 0% y un 0,3% de asfalto, entre un 0% y un 0,1% de yeso (figura 4.2) y cantidades no significativas de madera, vidrio, plástico, metal, suelo natural y partículas ligeras (figura 4.3). En la figura 4.9 pueden verse representados todos estos valores.

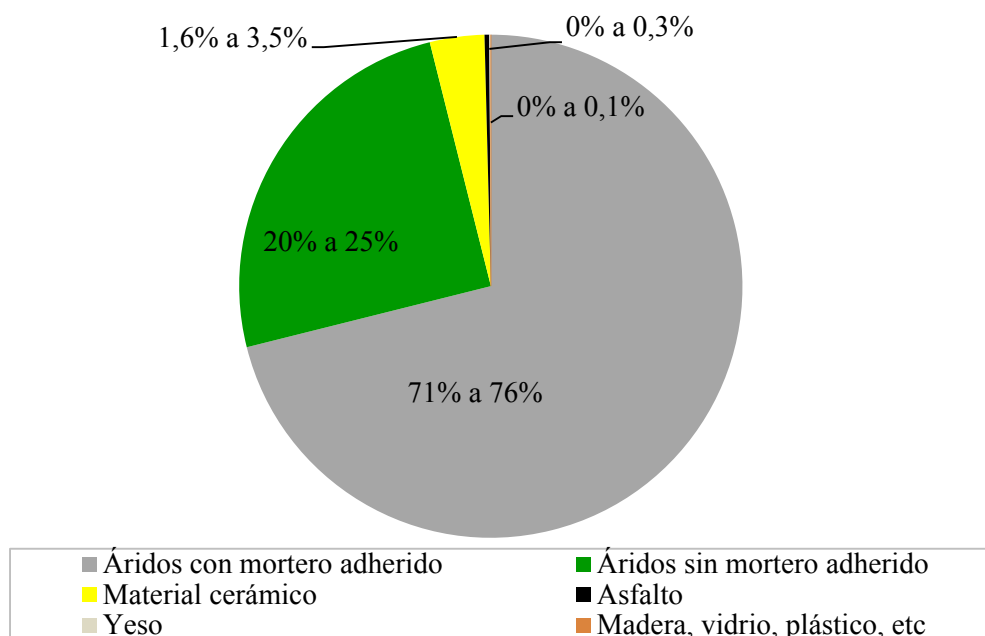


Figura 4.9.- Componentes de los ARs. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Jiménez et al. (2011).

Como puede verse en la figura 4.10, el contenido de mortero adherido, que como se ha comentado anteriormente es el principal causante de la menor calidad de los ARs frente a los áridos naturales, es muy variable, oscilando entre un 25% y un 70% en masa en función del tamaño máximo del árido (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009). Además, en las fracciones más pequeñas, el contenido de mortero adherido es mayor que en las fracciones más gruesas (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009). Así mismo, el contenido de mortero también depende del tipo de árido natural original, de la dosificación del hormigón original y del proceso de machaqueo (MDOT, 2011).

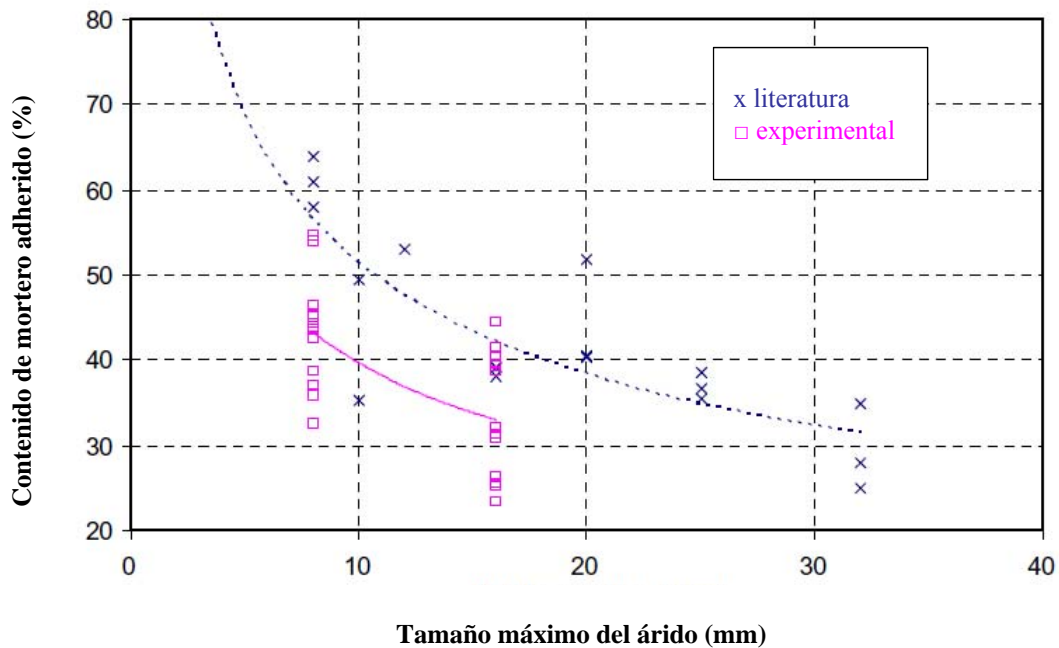


Figura 4.10.- Contenido de mortero adherido en función de la fracción granulométrica. Fuente: Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez (2009).

A partir del análisis de las estructuras cristalinas presentes en la fracción fina del AR mediante técnicas de difracción de rayos X, Chen et al. (2011) indican que el cuarzo (SiO_2) y la calcita (CaCO_3) son sus principales componentes. El mismo análisis muestra que las principales fases cristalinas de los finos y el polvo mineral son el cuarzo (SiO_2), la calcita (CaCO_3) y la portlandita (Ca(OH)_2), sin que haya diferencias en las fases cristalinas encontradas en función del tamaño de árido (fino o polvo mineral) estudiado (Wong et al., 2007).

4.2.4. Otras propiedades de interés

4.2.4.1. Propiedades autocementantes

En el caso del empleo de AR como material granular está demostrado que la resistencia del mismo aumenta con el tiempo, lo que es debido a las propiedades autocementantes de este tipo de árido (Arm, 2001; Poon y Chan, 2006). Esta propiedad hace que el AR de tipo hormigón de lugar a bases granulares muy resistentes (FHWA, 2004b). La presencia de cemento no hidratado en el mortero adherido es la principal responsable de este fenómeno (FHWA, 2004b; Poon y Chan, 2006).

4.2.4.2. Reacciones álcali-sílice

La reacción álcali-sílice (ASR) se da como consecuencia de la interacción, en presencia de agua, de la disolución alcalina de los poros del hormigón con los minerales silíceos que forman parte de la composición de algunos áridos, dando lugar a un gel que aumenta de volumen (Segarra, 2005).

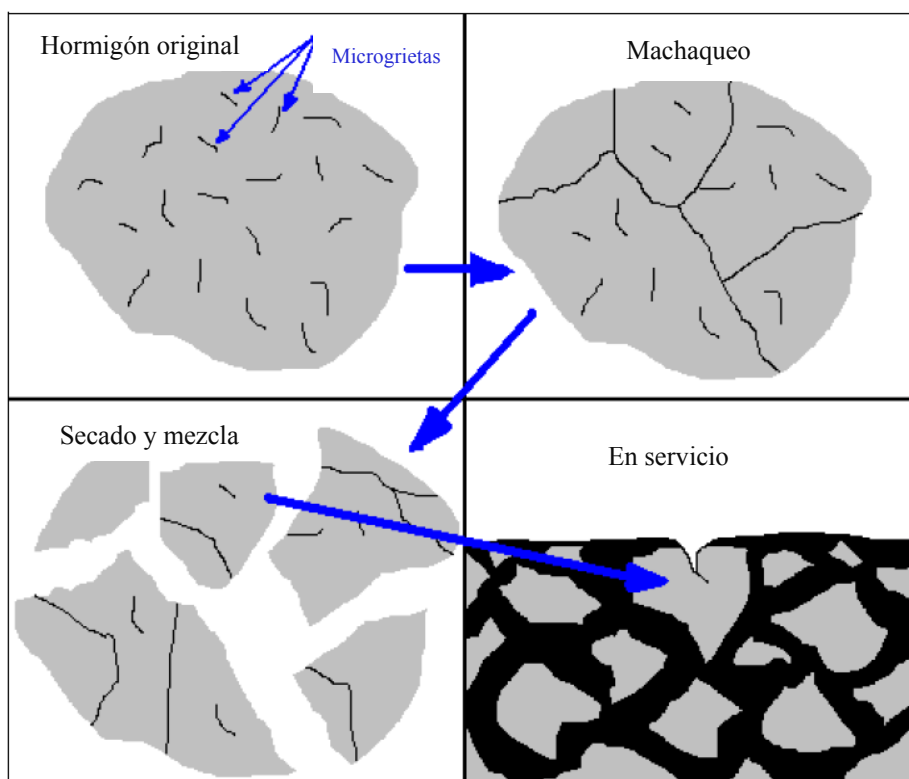


Figura 4.11.- Efecto de las microgrietas presentes en ARs afectados por reacciones álcali-sílice en la rotura de los áridos. Fuente: Geiger (2010).

Es preciso señalar que no hay consenso sobre la utilización de ARs afectados por ASR en mezclas bituminosas. Así, hay estudios que indican que este tipo de reacción no es preocupante si el AR se va a utilizar para fabricar mezclas bituminosas (MDOT, 2011). En cambio, otras investigaciones (Mills-Beale y You, 2010) cuestionan su viabilidad. También hay otros estudios que indican que se pueden utilizar, pero con ciertas precauciones. Por ejemplo, sería conveniente no utilizar la fracción fina o el polvo mineral y evitar el uso de agentes activantes de la adhesividad (anti-stripping), ya que estos últimos pueden potenciar los efectos negativos de este tipo de áridos (Geiger, 2010). Además, también debe seleccionarse adecuadamente el lugar en el que se van a emplear. En

particular, este tipo de áridos no son aptos para pistas aeroportuarias en las que reciban fuertes impactos como consecuencia del aterrizaje de los aviones. Esto es así ya que los ARs afectados por reacciones ASR suelen estar afectados por microgrietas (figura 4.11), siendo por tanto más propensos a degradarse mecánicamente (Geiger, 2010).

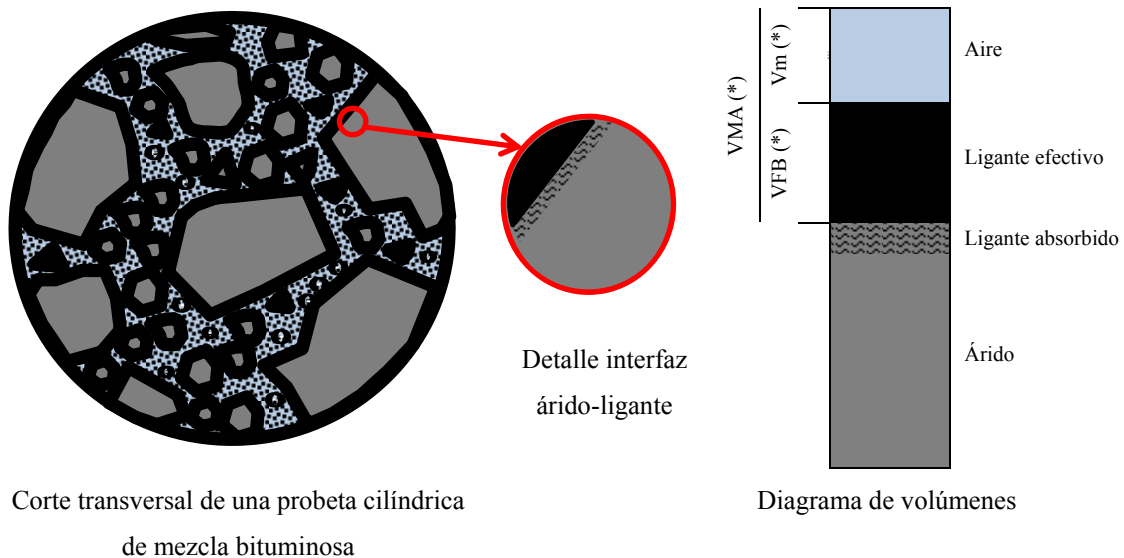
4.3. PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE FABRICADAS CON ÁRIDOS RECICLADOS DE TIPO HORMIGÓN

Como parece lógico, la diferencia entre las propiedades de los ARs y los naturales va a condicionar el comportamiento de las mezclas bituminosas fabricadas con AR. Además, es previsible que la diferencia de comportamiento entre las mezclas fabricadas con AR y las mezclas convencionales (fabricadas exclusivamente con árido natural) sea más acusada cuanto mayor sea la proporción de AR empleado en la mezcla. Se revisa a continuación la literatura técnica sobre la influencia del empleo de AR en las propiedades de las mezclas bituminosas en caliente.

4.3.1. Contenido de ligante y propiedades volumétricas

Las propiedades volumétricas (figura 4.12), es decir, el contenido de huecos en mezcla o huecos de aire (V_m), huecos en el árido mineral (VMA) y huecos rellenos de ligante (VFB) están relacionadas con el comportamiento de las mezclas bituminosas (Mallick, 2009). En este sentido, es bien conocido el efecto negativo que tiene un excesivo contenido de huecos de aire sobre la durabilidad de la mezcla. Así, cuanto mayor es el contenido de huecos en mezcla, el proceso de envejecimiento se producirá de forma más acelerada, por lo que la durabilidad de la mezcla será menor (Khandal y Chakraborty, 1996). Por otro lado, un contenido mínimo del 3% de huecos en mezcla previene la formación de roderas (Murali Krishnan y Rajagopal, 2004); mientras que un contenido de huecos de aire superior al 6% da lugar a mezclas susceptibles a fallar por fatiga (Murali Krishnan y Rajagopal, 2004). Sin embargo, en algunas aplicaciones es preferible que las mezclas presenten un valor elevado del contenido de huecos en el árido mineral, ya que proporcionará una mayor flexibilidad a las mismas, además de una mayor resistencia a la fisuración por bajas temperaturas (Pennsylvania Department of Transportation, 2003). Además, un contenido elevado de huecos en el árido mineral dota a la mezcla de un mayor espacio para permitir la expansión del betún y asumir la post compactación debida al tráfico durante la vida de servicio e incluso una variación en el contenido de ligante

durante su producción en planta (Pennsylvania Department of Transportation, 2003). También el contenido de huecos rellenos de ligante está relacionado con la durabilidad de la mezcla. En este sentido, un menor contenido de huecos rellenos de ligante puede dar lugar a mezclas con menor durabilidad (Murphy y Bentsen, 2001), sobre todo si se debe a que presentan un bajo contenido de ligante efectivo, es decir, el porcentaje de ligante que no ha sido absorbido por el árido (figura 4.12).



(*) VMA y Vm se expresan como porcentaje respecto al volumen total de la mezcla. VFB se expresa como porcentaje respecto al volumen de huecos en el árido mineral (VMA).

Figura 4.12.- Huecos en mezcla, huecos en el árido mineral, huecos rellenos de ligante, ligante efectivo y ligante absorbido. Fuente: elaboración propia a partir de Pavement Interactive (2010).

Tal y como puede verse en la figura 4.13a, las mezclas bituminosas en cuya fabricación interviene AR presentan contenidos óptimos de ligante (Bo) más elevados que las mezclas convencionales (Shen y Du, 2004 y 2005; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Wong et al., 2007; Bushal et al., 2011; Rafi et al., 2011; Muniz de Farias et al., 2012), debido a la alta porosidad del mortero de cemento (Wong et al., 2007; Muniz de Farias et al., 2012). Esto es más acusado cuando la sustitución de árido natural por AR se realiza en la fracción fina (Rafi et al., 2011), que, como se ha dicho anteriormente, presenta un mayor contenido de mortero de cemento (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009) y una mayor superficie específica (Rafi et al., 2011). Además Bushal et al. (2011) indican que el incremento en el contenido óptimo de ligante aumenta de forma lineal con el porcentaje de sustitución de AR en la mezcla.

Pueden apreciarse en la figura 4.13a las fuertes diferencias existentes entre los contenidos de ligante óptimo obtenidos para un mismo contenido de AR por diferentes autores. Estas diferencias de unos investigadores a otros podrían deberse a varias razones: el contenido de impurezas del AR empleado en la fabricación de las mezclas, ya que algunas impurezas, como el yeso, podrían aumentar la demanda de ligante; las fracciones en las que se utiliza el AR, pues, como se acaba de ver, la fracción fina demanda más ligante; y la normativa y especificaciones técnicas propias de cada país. Esta última consideración podría ser decisiva en la determinación del contenido óptimo de ligante. Así, por ejemplo, el Departamento de Transportes de Florida (FDOT) exige un mínimo de un 5% de contenido de ligante efectivo (Jajliardo, 2003). En cambio, en España este mínimo no se exige. Lo que se exige es un mínimo de ligante en la mezcla del 3,5% (Ministerio de Fomento, 2008). Por tanto, en este ejemplo, la dotación de betún será superior si la mezcla se dosifica siguiendo las especificaciones del FDOT, que si se dosifica siguiendo las especificaciones españolas.

Algunas investigaciones (Paranavithana et al., 2006; Mills-Beale y You, 2010) indican que el contenido de ligante efectivo (Pbe) de las mezclas bituminosas fabricadas con AR es inferior al de las mezclas convencionales. Esto es así porque la elevada absorción de los ARs provoca que exista una menor cantidad de ligante para recubrir los áridos (Paranavithana et al., 2006). Nuevamente la principal responsable de esta característica es la naturaleza absorbente del mortero de cemento presente en la superficie del AR. Además, la absorción es función del contenido de ligante. Por tanto, como puede verse en la figura 4.13b, cuanto mayor es el contenido de AR mayor es la absorción de ligante (Pba) (Bushal et al., 2011). Dado que cuando la sustitución de árido natural por AR se realiza en la fracción fina la absorción es mayor, Bushal et al. (2011) proponen que, por motivos económicos, esta sustitución se realice en la fracción gruesa, para evitar contenidos óptimos de ligante mayores.

Por otro lado, este tipo de mezclas presentan un contenido de huecos de aire (V_m) más elevado (Shen y Du, 2004 y 2005; Paranavithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Gul, 2008; 2009; Rafi et al., 2011), que incluso podría ser excesivo para porcentajes de AR superiores al 30% (Cupo-Pagano et al., 1994). Puede verse en la figura 4.14a, como los huecos en mezcla aumentan, en general, con el porcentaje de AR añadido a la mezcla (Cupo-Pagano et al., 1994; Paranavithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010,

2012a y 2012b; Mills-Beale y You, 2010; Rafi et al., 2011). Esta variación en el contenido de huecos en mezcla es atribuida por algunos autores a la porosidad del AR. Como se acaba de ver, la porosidad hace que el AR absorba una mayor cantidad de ligante y, por tanto, la película que lo envuelve es más fina haciendo que el encaje sea más difícil (Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b).

El porcentaje de sustitución del AR también influye tanto en el contenido de huecos en el árido mineral (VMA) como en el contenido de huecos rellenos de ligante (VFB). Así, como se ilustra en las figuras 4.14b y 4.14c, a mayor porcentaje de AR, menor contenido de huecos en el árido mineral y de huecos rellenos de ligante (Mills-Beale y You, 2010; Bushal et al., 2011). Algunos países cuentan en su normativa técnica con especificaciones relativas al valor de VFB. En este sentido, como se verá más adelante (apartado 4.3.2), se han dado casos de mezclas fabricadas con AR en las que el contenido de huecos rellenos con ligante no alcanza el límite inferior dado por las especificaciones (Wong et al., 2007).

Tal y como puede verse en la figura 4.15, con el incremento en el porcentaje de AR la densidad aparente de la mezcla disminuye (Cupo-Pagano et al., 1994; Paravithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Mills-Beale y You, 2010; Rafi et al., 2011). La variación en las densidades es atribuida por algunos investigadores a la presencia de mortero de cemento altamente poroso (Paravithana et al., 2006, Rafi et al., 2011) en el AR y de baja densidad, así como a su elevada absorción (Paravithana et al., 2006). También hay autores que atribuyen la menor densidad de las mezclas con AR a la dificultad de compactación de este tipo de mezclas (Pérez et al., 2007 y 2010), con lo que tendrían más huecos de aire.

Otros autores matizan que la densidad aumenta con el contenido de ligante (Rafi et al., 2011), de tal forma que el incremento es menos notable cuanto mayor es la cantidad de ligante. Esto podría explicarse por la acción lubricante del betún, que permite una mayor compactación de los áridos hasta cierto punto, a partir del cual el ligante crearía una película gruesa que provoca la separación de los áridos.

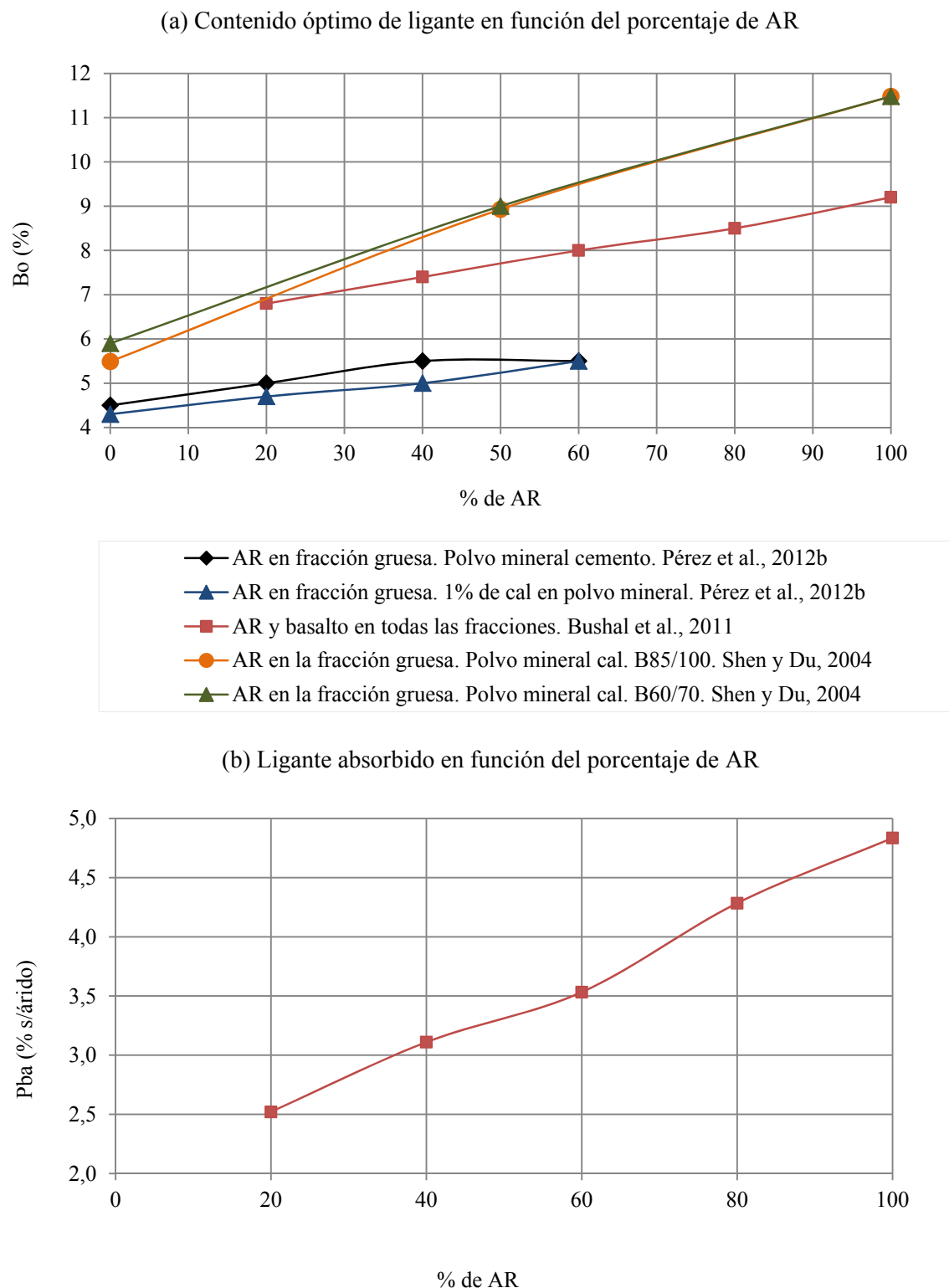


Figura 4.13.- Variación del contenido de ligante en función del porcentaje de AR: (a) Contenido óptimo de ligante en función del porcentaje de AR y (b) Ligante absorbido en función del porcentaje de AR. Fuente: elaboración propia a partir de Bushal et al. (2011).

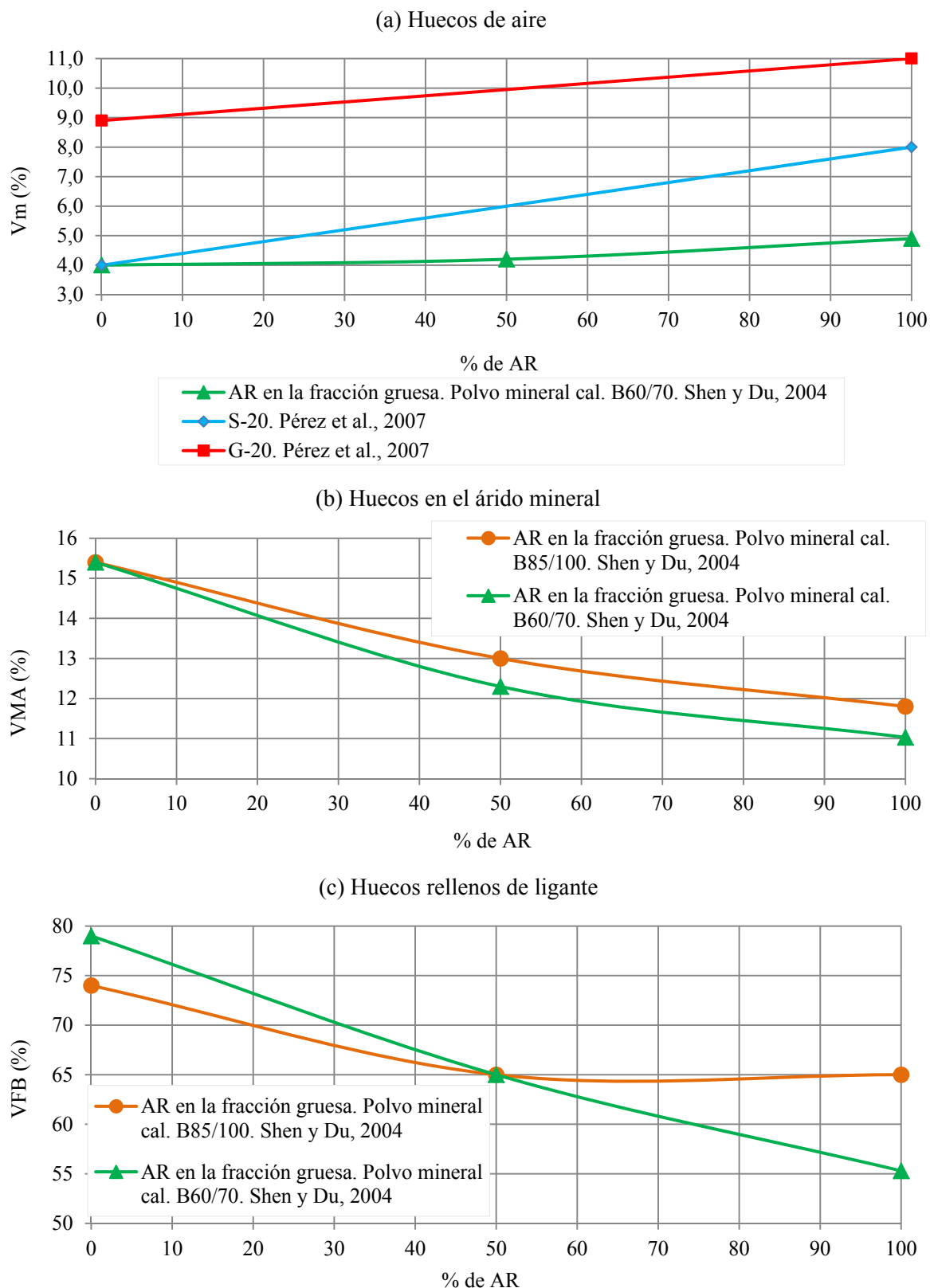


Figura 4.14.- Variación del contenido de huecos de la mezcla en función del porcentaje de AR: (a) Huecos de aire, (b) Huecos en el árido mineral y (c) Huecos rellenos de ligante. Fuente: elaboración propia a partir de datos de otros investigadores.

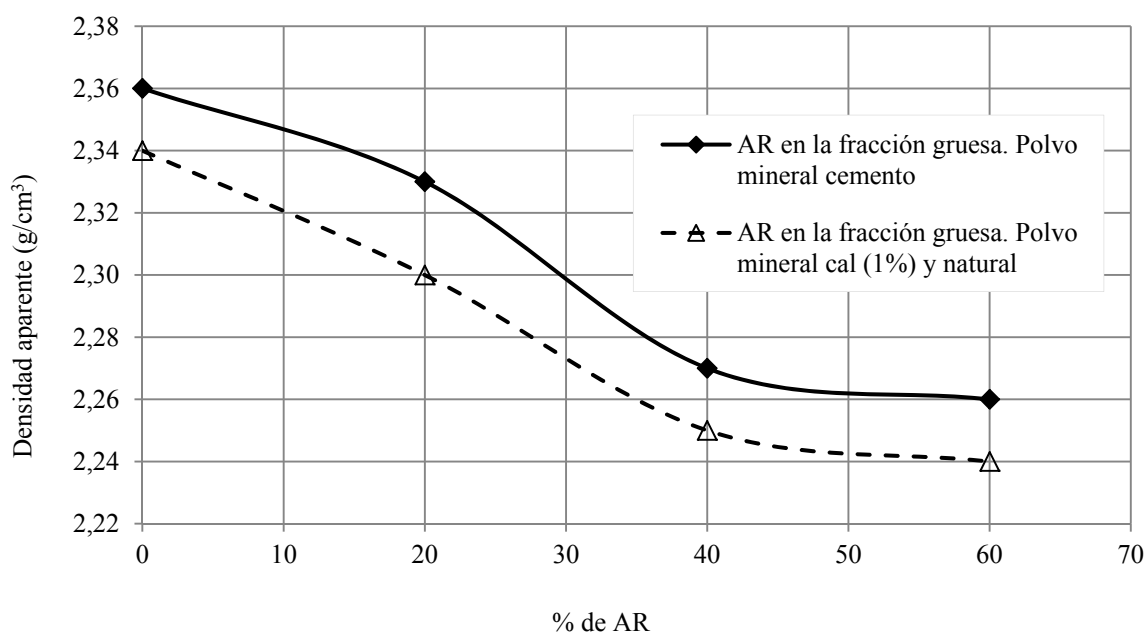


Figura 4.15.- Variación de la densidad aparente de la mezcla en función del porcentaje de AR. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Pérez et al. (2012b).

Respecto al tamaño del AR, Rafi et al. (2011) indican que la densidad y la reducción en la densidad debida al incremento del porcentaje de sustitución de AR son mayores en el caso de que se emplee la fracción gruesa.

4.3.2. Estabilidad y deformación Marshall

La estabilidad o carga de rotura se evalúa habitualmente mediante el método Marshall, que es uno de los métodos de dimensionamiento más ampliamente utilizados (Krebs y Walker, 1971), aunque también se puede determinar mediante otros métodos como el Hveem. La estabilidad de una mezcla bituminosa es indicativa de su capacidad para resistir las sollicitaciones del tráfico con unas deformaciones tolerables y se debe tanto a la cohesión aportada por el ligante hidrocarbonado como al rozamiento interno proporcionado por los áridos (Yoder y Witczak, 1975).

Altas estabilidades no son deseables si son debidas a un bajo contenido de huecos en el árido mineral o a un contenido deficiente de asfalto, pues podrían dar lugar a mezclas con baja resistencia a la fisuración, excesivamente rígidas en invierno y con tendencia a que sus bordes se desmoronen bajo las cargas de tráfico (Pennsylvania Department of Transportation, 2003). Esto es particularmente importante cuando las altas estabilidades

van acompañadas de bajas deformaciones. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que tampoco es deseable que una mezcla presente deformaciones excesivas pues suelen ir acompañadas de estabilidades bajas (Krebs y Walker, 1971), por lo que podrían dar lugar a mezclas poco resistentes a las deformaciones permanentes.

Con el fin de dosificar mezclas bituminosas para capa de base fabricadas con AR Cupo-Pagano et al. (1994) llevaron a cabo ensayos Marshall sobre probetas de los siguientes tres tipos de mezcla:

- Mezclas fabricadas íntegramente con AR procedente de la demolición de estructuras de hormigón.
- Mezclas fabricadas con un 77% de AR corregido con arena basáltica y polvo mineral.
- Mezclas fabricadas con árido calizo con sustitución parcial de AR en porcentajes del 10%, 30% y 50%, en todas las fracciones.

Las mezclas fabricadas íntegramente con AR no alcanzaron los valores mínimos de estabilidad Marshall exigidos de forma habitual en las especificaciones italianas; mientras que las mezclas fabricadas con AR corregido con arena basáltica presentaron un claro incremento de la estabilidad, aunque con excesivos huecos en mezcla. Las mezclas fabricadas con árido calizo y sustitución parcial de AR alcanzaron para todos los porcentajes de sustitución los valores mínimos de estabilidad exigidos por las especificaciones italianas para capas de base, sin que el porcentaje de sustitución produjese importantes variaciones en el valor de la estabilidad. Sin embargo, para el porcentaje de sustitución del 50% los huecos en mezcla fueron excesivos.

De los resultados obtenidos por Cupo-Pagano et al. (1994) mediante el ensayo Marshall, se concluye que se pueden realizar sustituciones de hasta un 30% de AR de tipo hormigón, ya que porcentajes mayores dan lugar a contenidos de huecos excesivos. En carreteras de bajo tráfico, caminos peatonales y carriles bici, podría llegarse a un porcentaje mayor.

Aljassar et al. (2005) llevaron a cabo ensayos Marshall según la norma AASHTO-T-245 sobre mezclas bituminosas en caliente para capas de rodadura fabricadas con AR (no especifican los autores ni el porcentaje ni la fracción en la que se utiliza el AR) y arenas

naturales y de machaqueo. El AR utilizado procedía de la demolición de un edificio en Kuwait. La estabilidad y la deformación determinadas mediante el ensayo Marshall se encontraban dentro del rango permitido por las especificaciones kuwaitíes al respecto.

En una investigación llevada a cabo en Singapur por Wong et al. (2007) se estudió la idoneidad de utilizar AR obtenido de estructuras de hormigón en la fracción fina y el polvo mineral ($<0,075$ mm). Para ello analizaron cuatro tipos diferentes de mezclas para capa de rodadura (LTA-W3B), todas ellas fabricadas con betún de penetración 60/70:

- Una mezcla de control, en la que el 100% del árido era granito.
- Una mezcla con sustitución del polvo mineral granítico por polvo mineral reciclado, lo que supone un 6% de AR.
- Una mezcla en la que tanto el polvo mineral como una parte del árido fino ($<3,15$ mm) son reciclados. Esto supone un total de un 45% de AR sobre la masa total del árido. En las demás fracciones granulométricas se utilizó granito.
- Una mezcla igual a la anterior (con un 45% de AR), pero en la que el AR fue tratado mediante calcinación para convertir la calcita en cal y mejorar así las propiedades mecánicas de la mezcla.

Como puede apreciarse en la figura 4.16 la estabilidad Marshall obtenida según la norma ASTM D1559-89 en probetas compactadas con 75 golpes por cara, cumplía en todos los casos con las especificaciones nacionales (>9 kN). Además, puede observarse el aumento de la estabilidad en las mezclas fabricadas con AR respecto a la mezcla de control. Esto se produjo tanto en las mezclas con AR calcinado como con AR sin calcinar, por lo que posiblemente la utilización de AR sea la responsable de esta mejoría.

La deformación (2-4 mm) y los huecos en mezcla (3-5%) también cumplieron con las especificaciones nacionales. No fue así con los huecos rellenos de ligante, pues como puede verse en la tabla 4.5 las mezclas en las que se había introducido AR sin tratar mediante calcinación presentaban un contenido de huecos rellenos de ligante excesivamente bajo, lo que podría dar lugar a mezclas con una baja durabilidad.

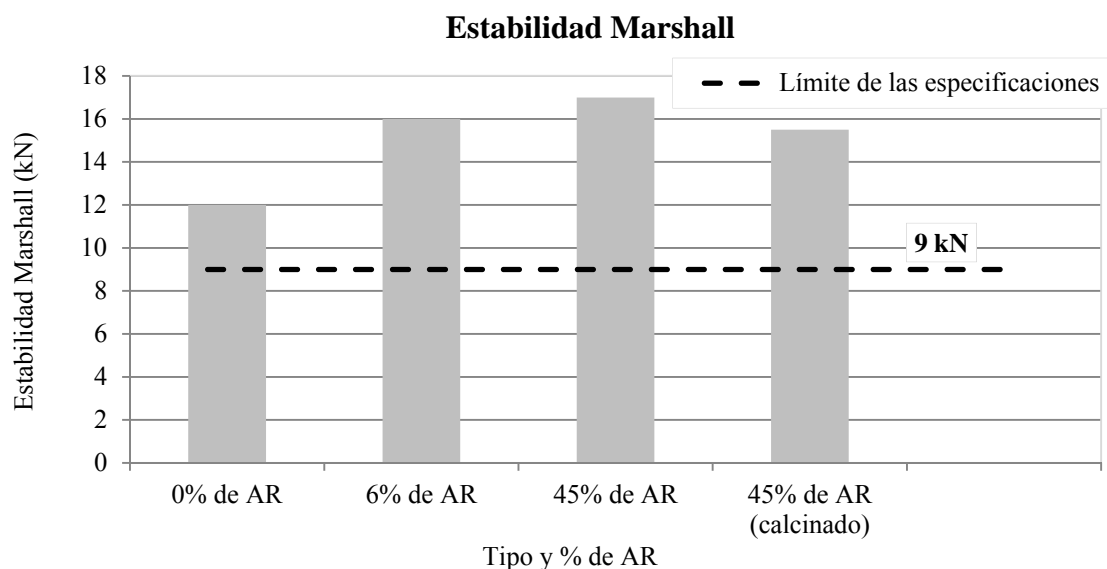


Figura 4.16.- Valores de la Estabilidad Marshall en la investigación llevada a cabo en Singapur. Fuente: Wong et al. (2007).

Mezcla	VFB (%)
100% granito	75
6% AR (sin tratar)	72
45% AR (sin tratar)	73
45% AR (calcinado)	76
Especificaciones de Singapur	75 a 82

Tabla 4.5.- Huecos rellenos de ligante en mezclas fabricadas con sustitución parcial de AR. Fuente: Wong et al. (2007).

En Brasil, Silva y Padula (2010) ensayaron mezclas bituminosas en caliente para carreteras urbanas de bajo tráfico. Para ello emplearon un 98% de AR de RCD y un 2% de cal hidratada (en el polvo mineral). Fabricaron mezclas con dos granulometrías diferentes y dos betunes de distintas penetraciones (50/70 y 35/45), es decir, un total de cuatro mezclas. Tras realizar el ensayo Marshall con 75 golpes por cara, obtuvieron que las estabilidades cumplieran con las especificaciones brasileñas al respecto, para las cuatro mezclas analizadas.

Rafi et al. (2011) fabricaron mezclas con un árido natural de cantera de la zona de Karachi (Pakistán) y AR de RCD. La sustitución del árido natural por el AR se hizo de forma separada en la fracción fina y en la fracción gruesa. En ambos casos, con porcentajes de sustitución en peso sobre el total de la fracción del 0% (mezcla de control), 25%, 50% y 75%. Tras la realización de ensayos Marshall siguiendo la norma ASTM 1989 (con 75

golpes por cara) concluyeron que el módulo Marshall (cociente entre la estabilidad y la deformación) disminuía al aumentar el contenido de ligante, siendo esta disminución menos acusada con altos contenidos de ligante. Atribuyeron este efecto a la reducción en la fricción entre partículas de áridos a medida que va aumentando el contenido de ligante. Así, la deformación aumentaba de forma más rápida que la estabilidad. Además, el módulo Marshall disminuía con la incorporación de AR, como consecuencia de la menor estabilidad y mayor deformación que sufrían las mezclas que presentaban AR en su composición. Como puede verse, en este caso, al contrario que en la investigación de Wong et al. (2007), la estabilidad Marshall disminuía en las mezclas que presentaban AR. Como ya se comentó anteriormente, en la investigación de Wong et al. (2007) las mezclas con AR también utilizaban AR en el polvo mineral. Por otro lado, tras realizar un análisis estadístico de la varianza concluyeron que este tipo de material es apto para fabricar mezclas bituminosas en caliente en un porcentaje de sustitución de hasta un 50%.

En A Coruña (España), Pérez et al. (2007, 2010) fabricaron mezclas bituminosas en caliente de tipo S-20 y G-20 para capa intermedia y de base respectivamente. Utilizaron tanto AR como árido natural (un esquisto feldespático). Analizaron porcentajes del 0%, 50% y 100% de AR. La mezcla con un 100% de AR resultó no ser viable, ya que para el rango de contenidos de ligante ensayados no presentaba cohesión, como consecuencia de la mayor demanda de ligante de los ARs. Por ello, finalmente estudiaron solo los porcentajes del 0% y 50% de AR. La sustitución de árido natural por reciclado se realizó en todas las fracciones, excepto el polvo mineral. Este último fue el proveniente del proceso de trituración del árido natural. Llevaron a cabo ensayos Marshall con 75 golpes por cara, siguiendo la norma NLT-159. Concluyeron que los parámetros Marshall de todas las mezclas cumplían con las especificaciones españolas para tráfico medios y bajos (tabla 4.6).

% AR	Granulometría	E (kN)	D (mm)	V _m (%)	VMA (%)
0	S-20	10,8	2,6	4,0	15,0
50	S-20	12,6	2,9	8,0	20,2
0	G-20	11,0	2,8	8,9	18,0
50	G-20	11,5	2,7	11,0	20,9
Requisitos PG-3 para T4 (*)		8 a 12	2,5 a 3,5	4-8 (**)	>14

(*) T4 es la categoría de tráfico pesado más baja (IMDp<50 vp/h).

(**) Solo para la S-20.

Tabla 4.6.- Estabilidad y deformación Marshall de mezclas fabricadas con AR. Fuente: Pérez et al. (2010).

Posteriormente, Pérez et al., (2012a, 2012b) fabricaron mezclas AC 22 base G y AC 22 base S con porcentajes de sustitución del AR del 0%, 20%, 40% y 60% en la fracción gruesa. Utilizaron como árido virgen uno de tipo calizo y un esquisto feldespático (de tipo silíceo). Como polvo mineral utilizaron dos tipos: cemento Portland y cal hidratada. Esta última se utilizó solo con el árido silíceo y en un porcentaje del 1%, procediendo el resto del polvo mineral del árido natural. Durante la fabricación de las mezclas se pudo apreciar cierta dificultad en la envuelta de las partículas silíceas y las cuarcitas presentes en el AR, hecho que se atribuye tanto a la composición química de las mismas como a la absorción de ligante por parte del mortero.

Como se puede comprobar en las figuras 4.17a y 4.17b (Pérez et al., 2012a y 2012b) en las mezclas bituminosas en caliente fabricadas con árido silíceo y AR en las que se emplea un 1% de cal hidratada como polvo mineral además de polvo mineral procedente del árido natural, tanto la estabilidad como la deformación Marshall disminuyen con el incremento del porcentaje de AR. Sin embargo, si el polvo mineral es de cemento, la estabilidad Marshall aumenta para los dos tipos de árido. En cambio, la deformación Marshall de las mezclas fabricadas con polvo mineral de cemento disminuye para el árido silíceo y aumenta para el calizo.

Por otro lado, tal y como se ilustra en la figura 4.17c (Pérez et al., 2012a y 2012b), en las mezclas fabricadas con árido silíceo, el módulo Marshall disminuye al aumentar el porcentaje de AR, con lo que también hay una tendencia a que se presente una disminución de la rigidez. Además, puede apreciarse que esta tendencia se produce tanto en las mezclas en las que el polvo mineral es cemento, como en las mezclas en las que hay un 1% de cal en el polvo mineral. Sin embargo, las mezclas son más rígidas con polvo mineral de cemento pues el módulo Marshall es mayor. En las mezclas con árido calizo el módulo Marshall no sigue una tendencia clara. A la vista de los resultados parece que el polvo mineral empleado va a tener una influencia decisiva en el comportamiento de las mezclas fabricadas con AR. Esto podría deberse a posibles reacciones químicas que se den entre el polvo mineral y algún componente del AR o el mortero.

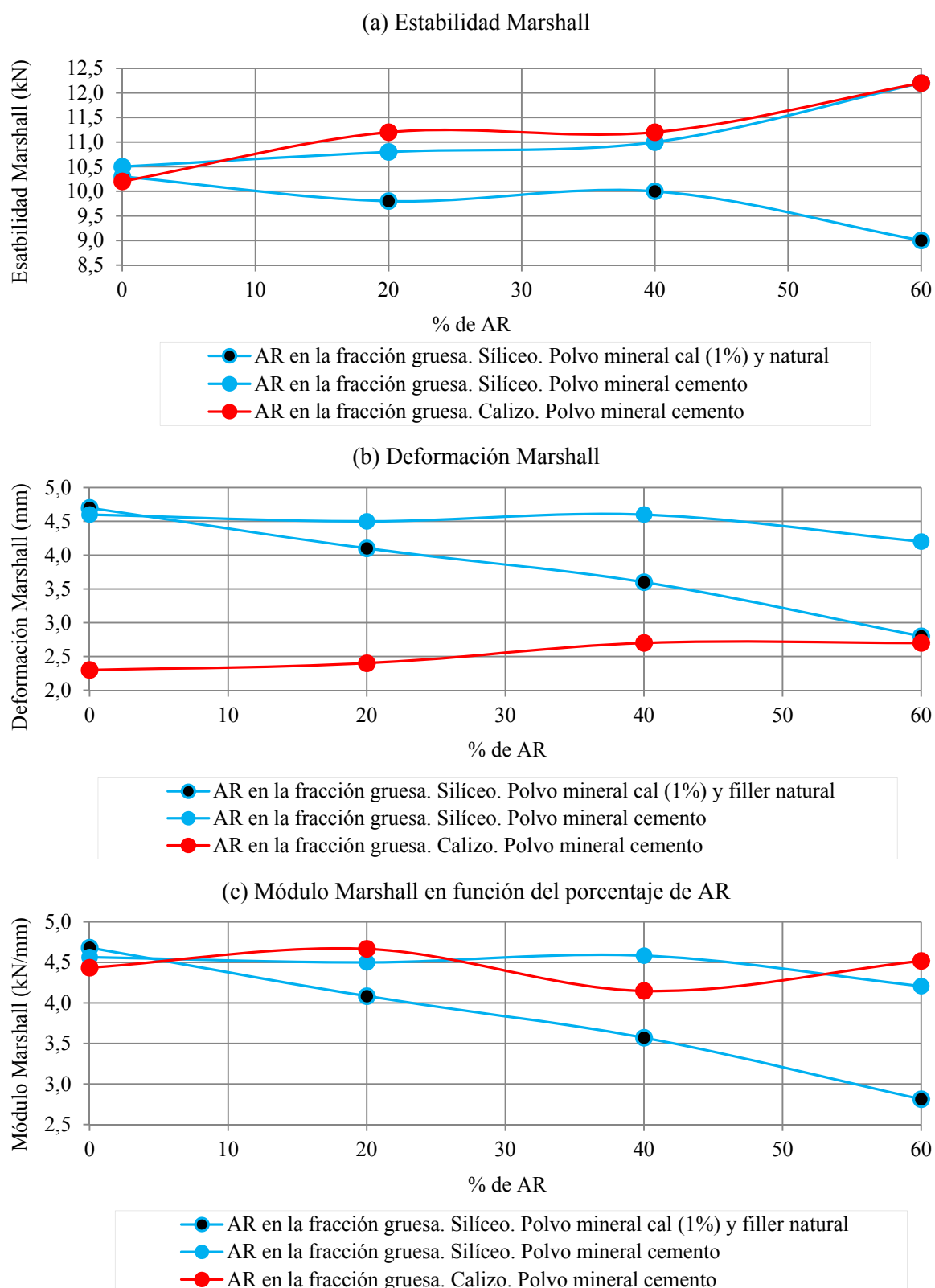


Figura 4.17.- Parámetros Marshall en función del porcentaje de AR: (a) Estabilidad Marshall, (b) Deformación Marshall y (c) Módulo Marshall. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Pérez et al. (2012a y 2012b).

Es importante destacar, de cara a las investigaciones llevadas a cabo en la presente tesis doctoral, que de la revisión bibliográfica realizada se puede extraer que las mezclas bituminosas cumplen en general con los valores de Estabilidad Marshall que fijan las diferentes especificaciones nacionales. Por tanto, tendrán suficiente capacidad para resistir las cargas del tráfico. Pero algunos autores indican que solo cumplen hasta un cierto valor de sustitución de árido natural por AR de tipo hormigón. Este límite, que varía entre un 30% y un 50% de AR (Cupo-Pagano et al., 1994; Rafi et al., 2011), depende de los factores siguientes: la naturaleza del árido natural, la naturaleza y origen del AR, el tratamiento llevado a cabo sobre el AR y el tipo de polvo mineral utilizado. Por tanto, con una adecuada selección de los materiales con los que se va a combinar el AR (árido natural, polvo mineral), se deberían alcanzar los requisitos de las especificaciones para la Estabilidad Marshall. Sin embargo, para su cumplimiento será preciso utilizar una mayor cantidad de ligante (Shen y Du, 2004 y 2005; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Wong et al., 2007; Bushal et al., 2011; Rafi et al., 2011; Muniz de Farias et al., 2012), con el consiguiente aumento de los costes. En este sentido, como ya se había mencionado anteriormente, es preferible utilizar la fracción gruesa del AR que la fina (Bushal et al. 2011; Rafi et al., 2011). Al poseer la primera menor contenido de mortero de cemento (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009) y una menor superficie específica (Rafi et al., 2011), precisará menos ligante que la fina.

4.3.3. Sensibilidad al agua

La sensibilidad al agua es la facilidad que presentan las mezclas bituminosas para que sus propiedades mecánicas se vayan degradando progresivamente como consecuencia de la acción del agua (Caro et al., 2008). El agua puede interactuar con la mezcla en estado líquido o en forma de vapor de agua (Caro et al., 2008), dando lugar a una pérdida de adhesividad en la interfaz entre el ligante hidrocarbonado y el árido (*stripping* en la terminología anglosajona) y/o a una falta de cohesión del mástico (Kiggundu y Roberts, 1988). Una mala sensibilidad al agua puede dar lugar a mezclas con una baja durabilidad. Existe un gran número de ensayos que permiten determinar la sensibilidad al agua de una mezcla bituminosa. Destacan los que pretenden evaluar indirectamente la adhesividad a partir de la pérdida de resistencia como por ejemplo los de tracción indirecta tras inmersión o inmersión-compresión. Estos ensayos ofrecen resultados cuantitativos, pero la disminución de la propiedad mecánica que se está evaluando no depende exclusivamente

de la falta de adhesividad entre árido y ligante, pues también hay otros factores que influyen, tal y como la presencia de polvos minerales hidrofílicos, la presencia de finos plásticos, la compacidad de la mezcla, el porcentaje de ligante, etc. (Miró Recasens, 1994).

En una investigación llevada a cabo por Shen y Du (2005) se fabricaron mezclas bituminosas en caliente con árido natural y AR. Los áridos se combinaron de las cuatro formas siguientes:

- (a) 100% de árido natural (árido de río de machaqueo).
- (b) 100% AR.
- (c) 50% de árido natural y 50% de AR tanto en la fricción fina como en la fracción gruesa del árido.
- (d) 100% de AR en la fracción gruesa y 100% de árido natural en la fracción fina.

El AR utilizado fue obtenido en Taichung City (Taiwán) y estaba compuesto principalmente de residuos de hormigón (81,03%). Como árido virgen se utilizó un árido ígneo de machaqueo. El polvo mineral utilizado fue calizo comercial. Se emplearon dos tipos de betún, con penetraciones 85/100 y 60/70. Para estudiar la sensibilidad al agua de cada una de las mezclas fabricadas compararon las estabilidades Marshall de dos grupos de probetas: uno acondicionado y otro de control. Las probetas acondicionadas fueron sometidas a un baño de agua a $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante un día y posteriormente fueron sometidas a otro baño de agua a $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 2 horas. Las probetas de control se sometieron exclusivamente a un baño de agua a $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 30-40 minutos. En todos los casos la resistencia conservada (relación entre la resistencia de las probetas acondicionadas y la resistencia de las probetas de control) fue superior al 75%, que es el mínimo establecido por las especificaciones taiwanesas.

En otra investigación, la llevada a cabo en Kuwait por Aljassar et al. (2005), se realizó un ensayo para determinar la pérdida de estabilidad Marshall, muy similar al anteriormente descrito. En este caso, las probetas acondicionadas solo se sometieron a un baño de agua a $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 1 día; mientras que las probetas de control se sometieron a un baño de agua a $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 30 minutos. La pérdida de estabilidad de las probetas acondicionadas fue inferior al 25%, que es el máximo recogido por las autoridades

kuwaitíes. Además se realizó un ensayo de inmersión-compresión con el fin de determinar la sensibilidad al agua. Las probetas se dividieron en dos grupos. En el grupo 1 las probetas se introdujeron en un baño de aire a 25°C durante 4 horas. En el grupo 2 las probetas se introdujeron en primer lugar en un baño de agua a 50°C durante cuatro días y luego en un segundo baño de agua a 25°C durante 2 horas. Tras el acondicionamiento, ambos grupos de probetas se rompieron a compresión. Se obtuvo un índice de resistencia conservada del 92%, que supera el 70% exigido en las especificaciones kuwaitíes. Además, la resistencia conservada a compresión media obtenida fue de 2.840 kPa, que supera los 1.400 kPa exigidos por las especificaciones kuwaitíes.

Los dos casos anteriores no concuerdan con los resultados obtenidos por otra investigación realizada en Australia (Paranavithana et al., 2006). En dicha investigación se prepararon los siguientes tipos de mezcla:

- Mezcla 1 (mezcla de control): los áridos utilizados son áridos basálticos procedentes de machaqueo.
- Mezcla 2: en la fracción fina (0-4,75 mm) se utilizaron áridos basálticos procedentes de machaqueo, mientras que en la fracción gruesa (4,75-20 mm) se utilizaron ARs.

El AR procedía del machaqueo de elementos de hormigón demolidos. En ambos casos se completó la granulometría con arena fina y se utilizó como polvo mineral (< 0,075 mm) cal hidratada. Se fabricaron probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 75 mm de altura, compactadas mediante el compactador giratorio con 80 y 120 giros, con contenidos de ligante del 5,0%, 5,5% y 6,0%. Estos investigadores determinaron la variación de resistencia a tracción indirecta en húmedo frente a la resistencia en seco. Asimismo, observaron que el potencial para sufrir pérdida de adhesividad por parte de la mezcla con AR era muy superior al de la mezcla de control. De tal forma que la mezcla fabricada con AR no cumplía con las especificaciones australianas al respecto, ya que superaba un 10% de pérdida de resistencia. Por otro lado, se obtuvieron grandes variaciones en las resistencias en seco y en mojado en la mezcla fabricada con AR, debido a la fácil separación del mortero adherido.

También las investigaciones llevadas a cabo por Pérez et al. (2007, 2010) señalaron que las mezclas en las que intervino AR procedente de RCD de edificación y obra civil presentaban una pérdida de resistencia conservada obtenida mediante el ensayo de inmersión-compresión (NLT-161 y NLT-162). Posteriormente, Pérez et al. (2012a y 2012b) también realizaron ensayos de tracción indirecta tras inmersión (EN-12.697-12), llegando a la misma conclusión. Pérez et al. (2007, 2010, 2012a y 2012b) atribuyeron este hecho a la presencia de materiales arcillosos, mortero e impurezas en el AR. Estos materiales absorben agua y la retienen en su interior, desplazando así al betún y disminuyendo consecuentemente su resistencia. En esta investigación también se dio otra explicación a este hecho, que es atribuida a la presencia de mortero de cemento. El mortero presenta una elevada absorción de betún, con lo que la película de ligante es más fina, dando lugar a fallos de envuelta. Así mismo la gran absorción de agua por parte del mortero hace que éste se rompa más fácilmente. Por otro lado, tal y como puede verse en la figura 4.18, al incrementar el porcentaje de AR existe una tendencia al aumento de la resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo y disminución de la resistencia conservada. Según dichos investigadores, esto último se debe previsiblemente a la falta de adhesividad del AR y a la gran absorción del mortero adherido.

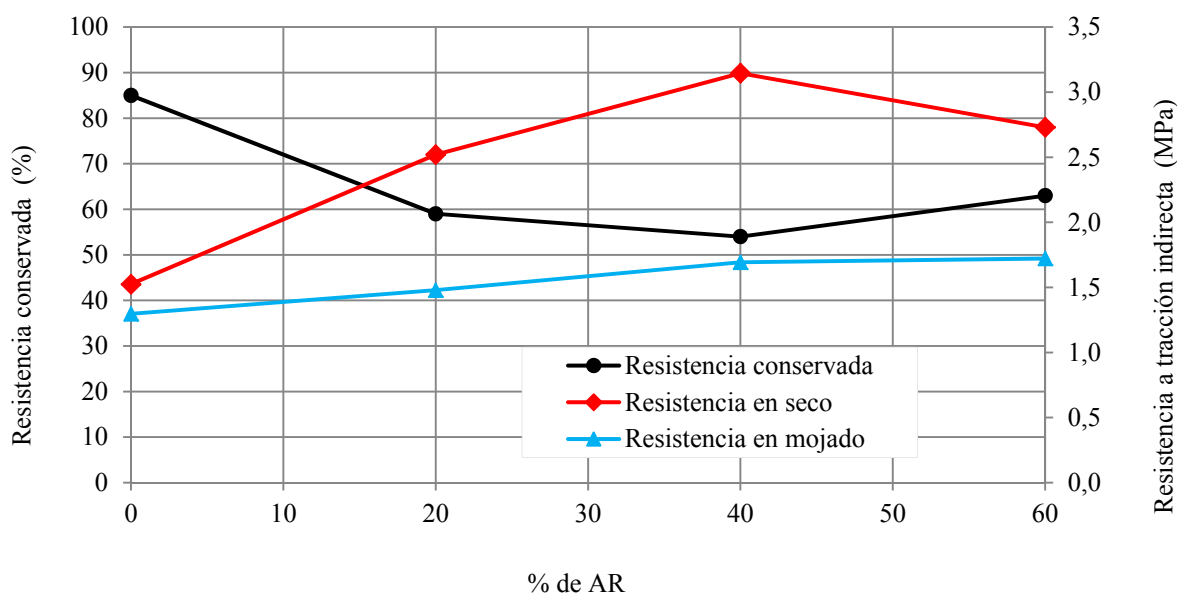


Figura 4.18.- Resistencia conservada y resistencia a tracción indirecta de mezclas bituminosas en función del porcentaje de AR. Mezclas con árido silíceo y polvo mineral de cemento. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Pérez et al. (2012a).

En Michigan Mills-Beale y You (2010) estudiaron la viabilidad de utilizar AR procedente solamente de la demolición de estructuras de hormigón para fabricar mezclas bituminosas en caliente para carreteras de bajo tráfico, dosificadas mediante el método del Superpave. Como árido natural utilizaron un árido basáltico, con sustituciones del 25%, 35%, 50% y 75% de AR. Para estudiar la sensibilidad al agua analizaron la resistencia conservada a tracción indirecta a 25°C según la norma ASTM D 4867/D 4867 M04. Concluyeron que a medida que aumenta el porcentaje de AR, aumenta la sensibilidad al agua. No obstante todas las mezclas cumplieron con las especificaciones americanas al respecto (salvo la fabricada con un 75% de AR) al presentar un índice de resistencia a tracción indirecta (ITSR) superior al 80%.

En China, Chen et al. (2011) analizaron el efecto del polvo mineral procedente de residuos de construcción de la demolición de un edificio de hormigón de la ciudad de Wuhan en el comportamiento de las mezclas bituminosas en caliente. El polvo mineral lo obtuvieron mediante tamizado durante 15 minutos de árido fino reciclado de la fracción 0/1,18 mm. Para la fabricación de las probetas utilizaron un árido basáltico como árido natural. En la muestra de control emplearon un polvo mineral calizo comercial; mientras que en las otras muestras la sustitución por polvo mineral reciclado fue del 100%. En todos los casos se utilizó un betún de penetración 60/70. Chen et al. (2011) obtuvieron la resistencia conservada a tracción indirecta sobre probetas Marshall fabricadas con 50 golpes por cara, siguiendo la norma AASHTO-T283. Concluyeron que el índice de resistencia conservada a tracción indirecta es mayor en el caso de las mezclas en las que hay una sustitución total del polvo mineral calizo comercial por polvo mineral reciclado. Por tanto, según estos resultados el polvo mineral reciclado mejora la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente.

Por tanto, puede verse que la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con sustitución parcial de AR es muy variable. Depende, entre otros factores, del porcentaje de sustitución del árido natural por AR y de la propia naturaleza tanto del AR como del árido natural con el que se combina. En cuanto a la naturaleza del AR cabe comentar que ésta depende, a su vez, de si el AR proviene de estructuras formadas exclusivamente por hormigón (ej: pavimentos de hormigón, pilas de puentes, etc) o también de edificios, residencias, viviendas, etc. Asimismo también influye en la naturaleza del AR la propia naturaleza de los áridos originales (si son de machaqueo o

redondeados, su composición mineralógica, su textura, etc). Así hay investigaciones en las que se satisfacen las especificaciones relativas a los ensayos para estudiar la sensibilidad al agua (Shen y Du, 2005; Aljassar et al., 2005; Chen et al., 2011); mientras que en otras los resultados se encuentran alejados de los valores mínimos exigidos (Paranavithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b). También hay otras investigaciones en las que la resistencia a la acción del agua es decreciente con el aumento del porcentaje de AR, de tal forma que para porcentajes del 75%, no se satisfacen las especificaciones (Mills-Beale y You, 2010). Como es bien sabido, una mezcla que no alcance los valores mínimos de resistencia conservada tendrá problemas de durabilidad. Por tanto, su utilización en la pavimentación de carreteras no sería adecuada, ya que provocaría que el firme se deteriorase con gran rapidez. Dado que, como se ha visto, existe una gran variabilidad de resultados, de cara a la realización de la presente tesis, el análisis de la sensibilidad al agua será de gran importancia, ya que una mala resistencia a la acción del agua de las mezclas fabricadas con AR sería un grave inconveniente a la hora de su futura utilización en los firmes de las carreteras.

4.3.4. Rigidez

Para diseñar y analizar el comportamiento ingenieril de una mezcla bituminosa es fundamental conocer su rigidez, ya que ésta está directamente relacionada con la capacidad del material para distribuir las cargas de tráfico (Pasetto y Baldo, 2010). Así, bajo la acción de los esfuerzos transmitidos por los vehículos, un elemento diferencial de firme, está sometido a tensiones verticales, horizontales y de cortante. Las capas inferiores en un firme flexible (base y subbase) son las que absorben la mayor parte de esas tensiones debidas al tráfico. En una capa de base de mezcla bituminosa que presente un valor alto de la rigidez tiene lugar la formación de un cono de reparto de la carga de tráfico más tendido. Es decir, se consigue una buena diseminación de las cargas, por lo que las tensiones de compresión llegan adecuadamente atenuadas a la explanada. Por el contrario si la rigidez de la mezcla bituminosa es baja el cono de reparto es menos tendido. Así la diseminación de las cargas es menor, por lo que las tensiones de compresión presentan un valor más elevado que en el caso anterior, pudiendo llegar a producir daños en la explanada. Sin embargo, una excesiva rigidez puede ir acompañada por una tensión de tracción horizontal inadmisibles en la fibra inferior de la capa de base del firme, existiendo la posibilidad de que para proteger la explanada se produzca la rotura de la propia capa de base. Además, las mezclas muy

rígidas son susceptibles a presentar fisuración a bajas temperaturas como consecuencia de la retracción térmica y la fatiga (AASHTO, 1993). Por tanto, en las mezclas bituminosas son deseables valores altos de la rigidez, aunque no excesivos.

La rigidez de una mezcla bituminosa es la relación entre la tensión y la deformación a una temperatura y un tiempo de aplicación de las cargas específicos (Lee y Mahboub, 2006):

$$S_m = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.1)$$

donde:

S_m = módulo de rigidez de la mezcla bituminosa para una temperatura y un tiempo de aplicación de las cargas específicos.

σ = tensión a la que está sometida la mezcla bituminosa.

ε = deformación unitaria sufrida por la mezcla bituminosa.

Con el fin de investigar la rigidez, el ensayo más utilizado es el del módulo resiliente, aunque también se puede utilizar el módulo dinámico. En la investigación llevada a cabo por Shen y Du (2005), la rigidez se estudió mediante la obtención del módulo resiliente a tracción indirecta siguiendo la norma ASTM D4123 sobre probetas Marshall de 101,6 mm de diámetro y 63,5 mm de altura compactadas con 75 golpes por cara. Para cada uno de los cuatro tipos de mezcla a estudiar (0%, 50% y 100% de AR en todas las fracciones y AR en la fracción gruesa y árido natural en la fina) se prepararon tres probetas. El ensayo se realizó a las temperaturas de $40 \pm 1^\circ\text{C}$ y $25 \pm 1^\circ\text{C}$. Puede observarse en la figura 4.19 que con el ligante más rígido (B60/70), la mezcla formada por AR en la fracción gruesa y árido natural en la fracción fina obtuvo mayores valores del módulo resiliente a ambas temperaturas de ensayo, lo cual se traduce, en este caso, en unas mayores rigideces y un mejor comportamiento frente a la degradación. Con el B85/100 no se confirman los resultados anteriores. En general los valores obtenidos con el B60/70 fueron mayores que los obtenidos con el B85/100 para todas las mezclas y para todas las temperaturas de ensayo, posiblemente como consecuencia de la mayor rigidez del betún B60/70. Además, en la figura 4.19 puede observarse que en las mezclas en las que interviene AR los valores de módulo resiliente son elevados. Así, teniendo presente que en Taiwan las temperaturas no suelen ser bajas, los investigadores indicaron que las mezclas con AR no presentan riesgo de fisuración térmica. Además, los elevados valores del módulo resiliente hacen que

estas mezclas presenten una adecuada rigidez, es decir, una buena resistencia mecánica y una adecuada capacidad para soportar y transmitir las cargas de tráfico. Por tanto, estas mezclas no se deteriorarán con facilidad como consecuencia del paso del tráfico vehicular.

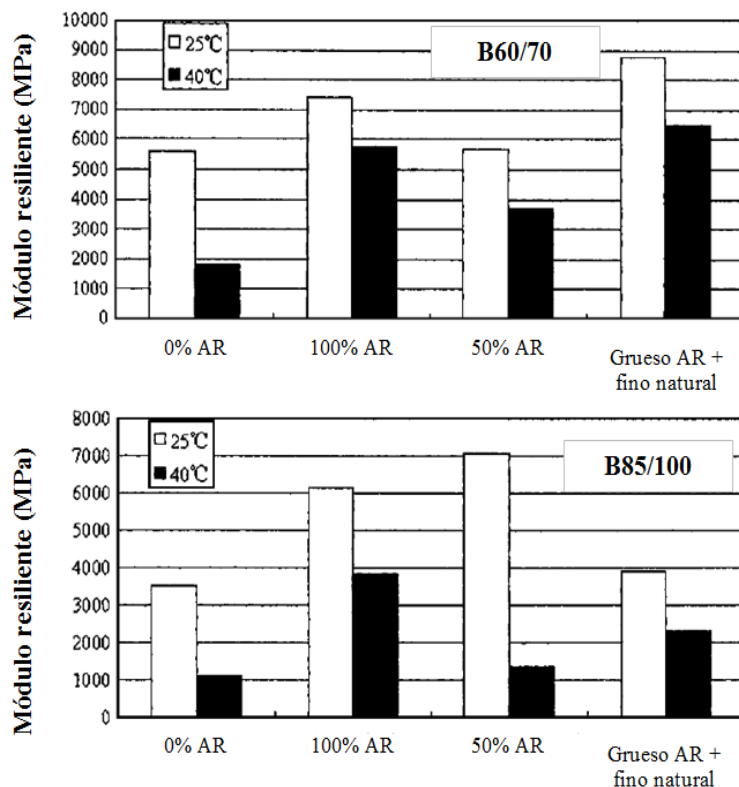


Figura 4.19.- Módulo resiliente de mezclas bituminosas fabricadas con sustitución parcial de AR. Fuente: Shen y Du (2005).

En Australia Paranavithana et al. (2006) determinaron el módulo resiliente a tracción indirecta según la norma australiana AS 2891.13.1. Estos investigadores no indican la temperatura de realización del ensayo. Llegaron a la conclusión de que la rigidez de las mezclas en las que interviene AR disminuye con el contenido de ligante (figura 4.20). Sin embargo, parece que los autores únicamente han ensayado la rama rica de betún y no la rama seca, en la que el módulo resiliente aumenta con el contenido de betún. Además, como puede verse en la figura 4.20, las mezclas con AR presentaron valores más bajos que la mezcla de control, lo cual atribuyeron a la baja resistencia del mortero adherido y a la propia utilización de AR. Sin embargo, los autores especificaron que los módulos resilientes tanto de la mezcla de control, como de la mezcla fabricada con AR, se encontraban dentro del rango de valores aceptables en Australia, aunque no precisaron los límites del citado rango.

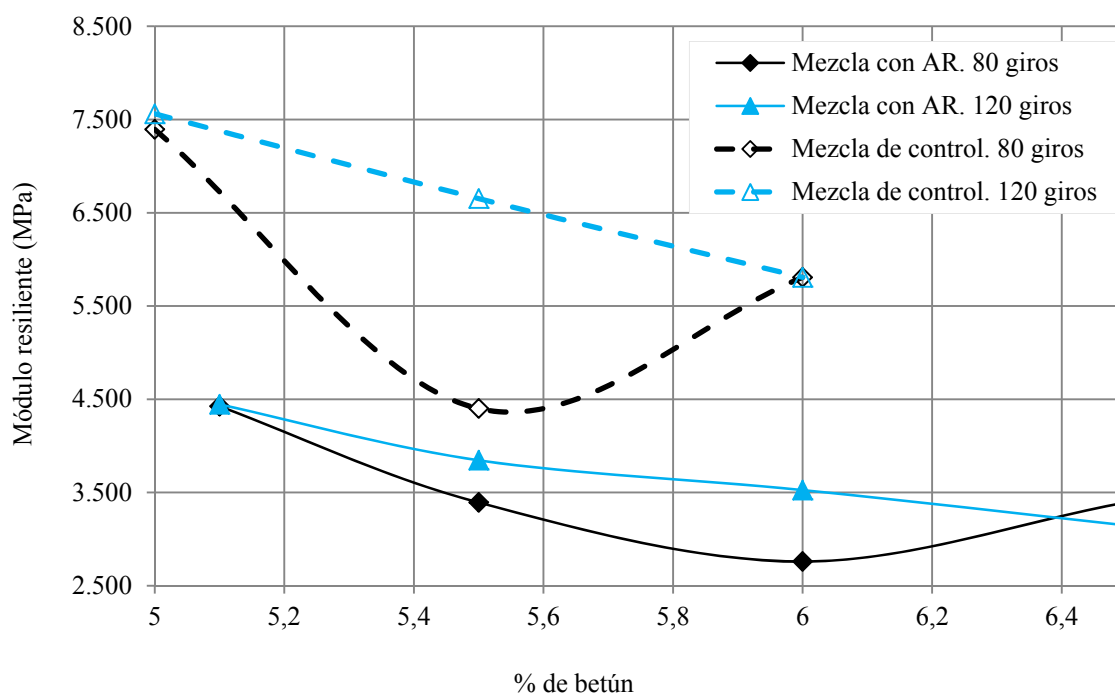


Figura 4.20.- Módulo resiliente en función del grado de compactación y del contenido de ligante. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Paranavithana et al. (2006).

Al igual que Paranavithana et al. (2007), Wong et al. (2007) también determinaron el módulo resiliente a tracción indirecta según el Australian Standard Method 13.1. Pero en este caso, los investigadores realizaron los ensayos a 25°C y 40°C. Dichos investigadores obtuvieron que las mezclas con sustitución del 45% de AR en la fracción fina y en el polvo mineral tenían mayores valores del módulo resiliente que aquellas en las que no había sustitución o la sustitución se realizaba exclusivamente en el polvo mineral (figura 4.21). Por otra parte, como puede verse en la figura 4.21, las mezclas fabricadas con AR calcinado demostraron tener un módulo resiliente ligeramente inferior al de las mezclas fabricadas con AR sin calcinar. Un análisis posterior mediante el microscopio electrónico de barrido permitió atribuir este hecho a que el polvo mineral de AR es más friable, pues es lajoso, por lo que se puede romper más fácilmente dando lugar a una mayor cantidad de partículas finas que rellenan los huecos de la mezcla bituminosa. Estos investigadores indicaron que las mezclas con AR tienen la ventaja de presentar una mejor capacidad de transmisión de las cargas que las mezclas convencionales. Sin embargo, tienen el inconveniente de que demandan una mayor cantidad de ligante.

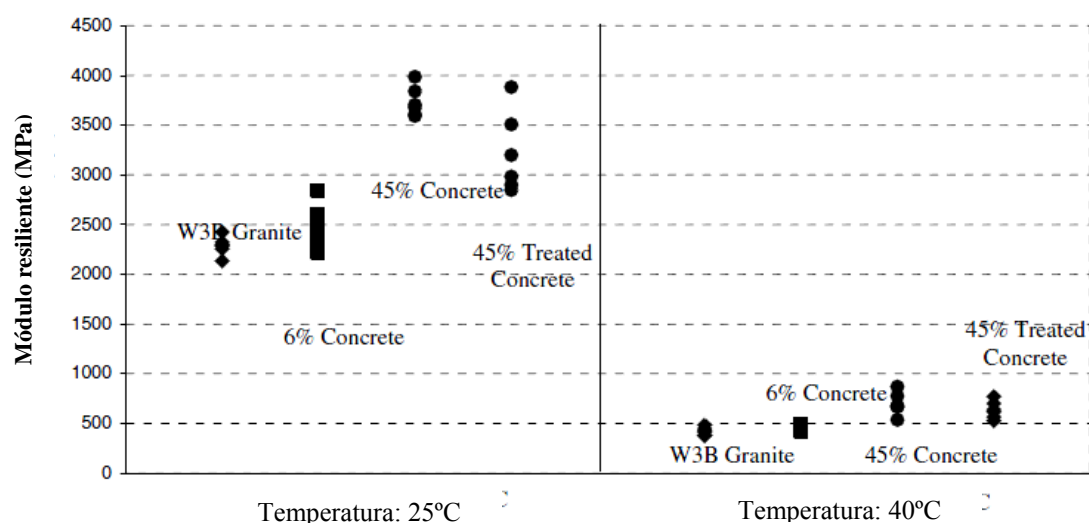


Figura 4.21.- Módulos resilientes a 25°C y 40°C para mezclas convencionales y con AR. Fuente: Wong et al. (2007).

Pérez et al. (2007 y 2010) ensayaron a fatiga probetas de dos tipos de mezclas bituminosas en caliente (S-20 y G-20) fabricadas con el 50% de AR en todas sus fracciones excepto el polvo mineral (de recuperación del árido natural). También ensayaron dos mezclas de control fabricadas íntegramente con árido natural. Para ello emplearon el ensayo de flexotracción dinámica en tres puntos según la norma NLT-350. A partir de este ensayo, entre otros resultados, obtuvieron el módulo dinámico (MD) de las mezclas. El MD es el cociente entre la amplitud cíclica de la función de tensión y la amplitud cíclica de la función de deformación en el ciclo 200. Como resultado de la investigación se pudo concluir que los módulos dinámicos obtenidos para las mezclas fabricadas con un 50% de AR se encontraban dentro del intervalo habitual (6.000 ± 1.000 MPa para la mezcla de tipo S-20 y 5.000 ± 1.000 MPa para la de tipo G-20). Sin embargo, los de la mezcla de control (0% de AR) fueron ligeramente inferiores. Por tanto, las mezclas bituminosas fabricadas con AR evidenciaban una mayor rigidez que las mezclas convencionales.

Mills-Beale y You (2010) determinaron el módulo dinámico de las mezclas bituminosas fabricadas con sustitución parcial de AR procedente de la demolición de estructuras formadas exclusivamente por hormigón, siguiendo la norma AASHTO T 62-03 a 13,2°C, 21,3°C y 39,2°C. Estos investigadores obtuvieron que a medida que aumentaba el porcentaje de AR, el módulo dinámico o rigidez disminuía (figura 4.22). Como puede verse, la mezcla con un 0% de AR tendrá un mejor comportamiento a altas temperaturas

(mayor resistencia a la deformación permanente a altas temperaturas), ya que su módulo dinámico a bajas frecuencias (altas temperaturas) es el más elevado. En cambio, la mezcla con un 75% de AR tendrá un mejor comportamiento a bajas temperaturas (resistirá mejor la fisuración térmica a bajas temperaturas), ya que su módulo dinámico a elevadas frecuencias (bajas temperaturas) es el menor.

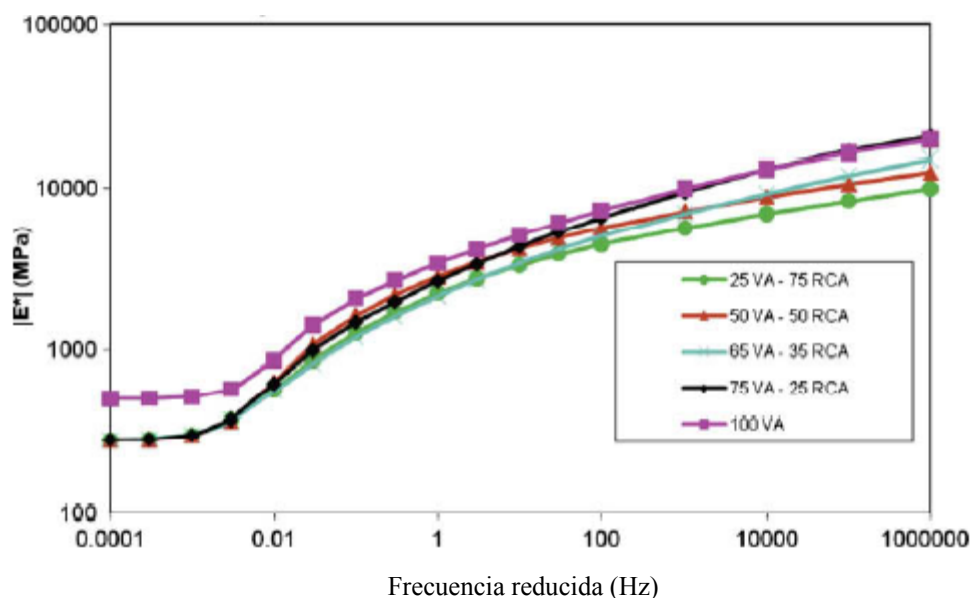


Figura 4.22.- Curvas maestras para el módulo dinámico en función de la frecuencia, para diferentes porcentajes de AR. Fuente: Mills-Beale y You (2010).

Así mismo, Mills-Beale y You (2010) determinaron el módulo resiliente a tracción indirecta según la norma ASTM D 4123-82 a 5°C, 25°C y 40°C. En este sentido, también obtuvieron que a medida que aumentaba el porcentaje de AR disminuía el módulo resiliente (figura 4.23). Sin embargo, cabe comentar que en la figura 4.23 los valores del módulo resiliente son sorprendentemente bajos para una mezcla bituminosa en caliente. Puesto que en la figura 4.22 los valores del módulo dinámico se encuentran dentro del rango habitual, todo parece indicar que podría haber una errata en la figura 4.23 (quizás la omisión de un cero en el eje de ordenadas). Mills-Beale y You (2010) hicieron un análisis estadístico de la varianza (ANOVA) sobre los resultados del módulo resiliente que les llevó a concluir que la temperatura a la que se lleva a cabo el ensayo tiene una mayor influencia en los resultados que el porcentaje de AR.

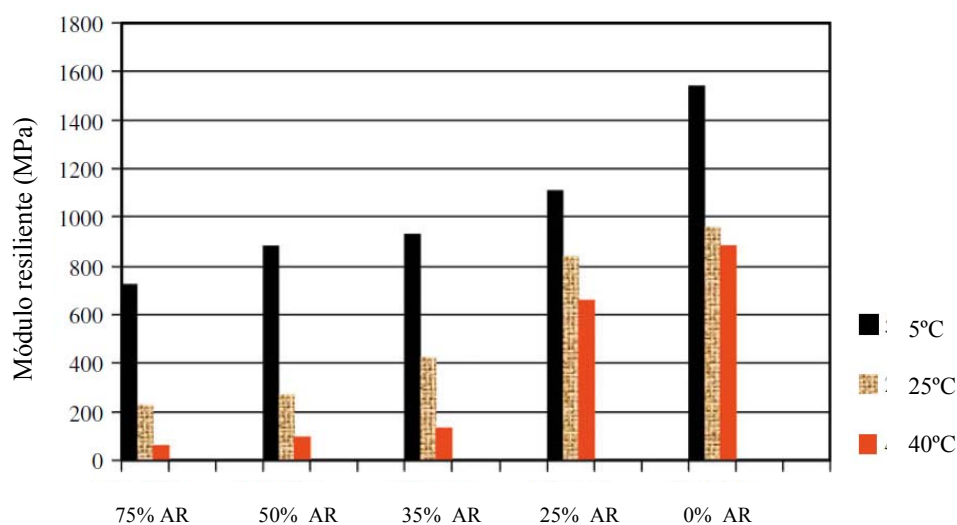


Figura 4.23.- Módulo resiliente en función del porcentaje de AR y de la temperatura. Fuente: Mills-Beale y You (2010).

Como se acaba de ver, algunos de los investigadores coinciden al afirmar que la utilización de AR como árido en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente produce mezclas con menor rigidez que las convencionales (Paranavithana et al., 2006; Mills-Beale y You, 2010); mientras que otros indican lo contrario (Shen y Du, 2005; Wong et al., 2007; Pérez et al., 2007 y 2010). Sin embargo, todos ellos indican que la rigidez se encuentra dentro de los rangos admisibles. Esta variabilidad en los resultados puede ser debida a las diferencias existentes entre los distintos AR utilizados. Además, a la hora de determinar la rigidez de una mezcla bituminosa hay varios factores que influyen en los resultados junto con el porcentaje de AR, como la temperatura de realización del ensayo, el contenido de ligante, la granulometría de la mezcla y su grado de compactación. En este sentido, menores temperaturas, menores contenidos de ligante y mayores grados de compactación producen mezclas más rígidas.

4.3.5. Resistencia a la deformación permanente

De forma general, la evidencia experimental demuestra que la deformación que se produce en las mezclas bituminosas cuando sobre ellas actúan las cargas de tráfico está formada por dos componentes recuperables (elástica y viscoelástica) y dos irreversibles (plástica y viscoplástica) (Uzan, 1996; Garba, 2002). Por tanto, la deformación total de una mezcla bituminosa puede expresarse de la siguiente forma (NCHRP, 2002):

$$\varepsilon_T = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{ve} + \varepsilon_{vp} \quad (4.2)$$

donde:

- ε_T = deformación total.
- ε_e = deformación elástica, recuperable e independiente del tiempo.
- ε_p = deformación plástica, irrecuperable e independiente del tiempo.
- ε_{ve} = deformación viscoelástica, recuperable y dependiente del tiempo.
- ε_{vp} = deformación viscoplástica, irrecuperable y dependiente del tiempo.

El predominio de una u otra componente depende de varios factores como la temperatura de servicio, la velocidad de aplicación de las cargas y el nivel de las cargas (Uzan, 1996). Así, por ejemplo, se ha comprobado empíricamente que a elevadas temperaturas y cortos períodos de aplicación de las cargas, en la deformación permanente la componente plástica es predominante, mientras que la viscoplástica es despreciable (Uzan, 1996). En cambio, a medida que comienza la fluencia de la mezcla bituminosa, es decir, con un período de aplicación de la carga lo suficientemente largo, la componente viscoplástica ya no es despreciable (Garba, 2002).

La acumulación de deformación permanente, plástica o no recuperable en las mezclas bituminosas, es particularmente importante a elevadas temperaturas de servicio. En el caso de las mezclas bituminosas, bajo la repetición de las cargas del tráfico y como consecuencia de una insuficiente resistencia a la deformación permanente, se pueden producir densificaciones (decrementos volumétricos) y/o deformaciones excesivas debidas al esfuerzo cortante. Este último mecanismo es el que más afecta a las deformaciones permanentes (Sousa et al., 1991).

Las deformaciones permanentes se manifiestan fundamentalmente por la formación de roderas en la capa de rodadura de los firmes (Pasetto y Baldo, 2010). Sin embargo, aunque se manifiesten en la superficie, también pueden tener lugar en una o más capas asfálticas, en capas granulares inferiores e incluso en la explanada. Como es sabido, las roderas son unas depresiones longitudinales que aparecen en la zona de rodada de los vehículos, como consecuencia de la aplicación de las sucesivas cargas del tráfico, que van acompañadas o no por cordones longitudinales de material. Se trata de uno de los deterioros que más afectan a los firmes flexibles (Garba, 2002), reduciendo su vida útil y ocasionando

perjuicios para los vehículos y usuarios de la carretera (Sousa et al., 1991). Sin embargo, las roderas no son el único deterioro asociado a las deformaciones permanentes, ya que éstas también pueden propiciar la aparición de fisuras (Garba, 2002). Por tanto, el análisis de la resistencia a las deformaciones permanentes en una mezcla bituminosa es de crucial importancia.

Con el fin de determinar el comportamiento de las mezclas bituminosas frente a la deformación permanente, se debe analizar la respuesta del material cuando presenta una rigidez baja; es decir, a elevadas temperaturas o grandes períodos de aplicación de las cargas (Read y Whiteoak, 2003). Para ello pueden llevarse a cabo diferentes ensayos (NCHRP, 2002), como se irá viendo a lo largo del presente apartado, entre los que destacan los de rodadura y los de compresión axial o triaxial (bajo carga constante, cíclica o dinámica).

Como se ha comentado, en la investigación llevada a cabo por Shen y Du (2004 y 2005) se utilizó como árido virgen un árido ígneo de machaqueo y polvo mineral calizo comercial. Se emplearon dos tipos de betún: B60/70 y B85/100. Como se mencionó con anterioridad, las mezclas bituminosas se fabricaron con cuatro diferentes combinaciones de áridos: a) 0% de AR, b) 50% de AR en todas las fracciones, c) 100% de AR y d) AR en la fracción gruesa y árido natural en la fracción fina.

En este caso, la resistencia a la deformación permanente se investigó mediante el ensayo en pista de laboratorio, sobre probetas de 300x300 mm de sección y 50 mm de altura. Las cargas utilizadas fueron de 1,12; 1,65 y 2,18 MPa, con temperaturas de $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ y $25\pm 1^{\circ}\text{C}$, en seco. Las mediciones de la profundidad de la huella se realizaron a los 100, 200, 400, 800, 1.400, 1.890 y 2.520 ciclos. Los resultados obtenidos (figura 4.24) indican que la elevada proporción de caras de fractura del AR mejora en algunos casos la resistencia de las mezclas frente a la deformación permanente. Por otro lado, la inestabilidad de las mezclas fabricadas con un 50% de AR y un 50% árido virgen en todas las fracciones, en particular cuando el ensayo se lleva a cabo a 60°C , hace que no sean aptas para su uso. Sin embargo con 100% de AR obtuvieron buenos resultados. Los autores no explicaron las razones que pudieron llevar a producir estos resultados aparentemente contradictorios.

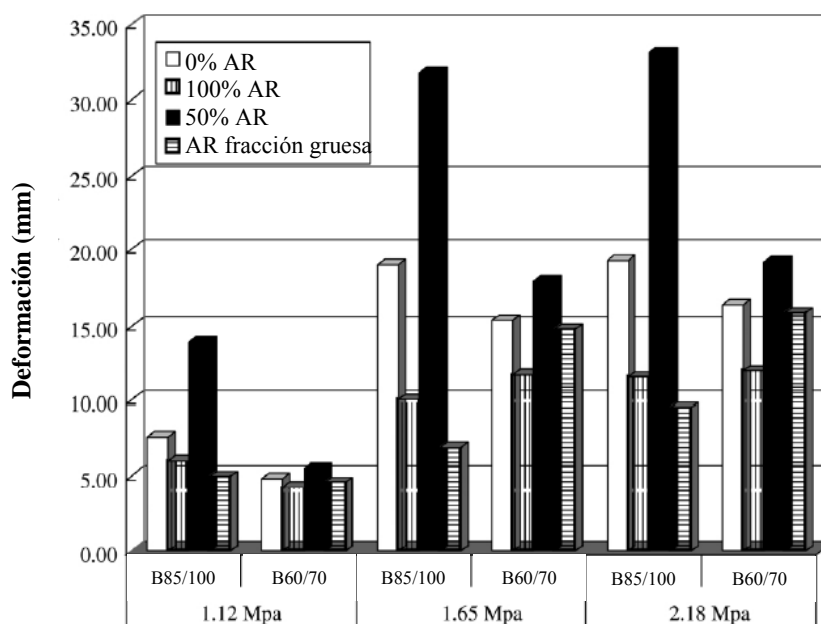


Figura 4.24.- Deformación acumulada en el ciclo 2.520 del ensayo de pista de laboratorio a 60°C. Fuente: Shen y Du (2004).

En la investigación llevada a cabo en Kuwait por Aljassar et al. (2005) se sometió la mezcla bituminosa, que como se mencionó anteriormente fue fabricada con AR y arenas naturales y de machaqueo, al ensayo en pista de laboratorio con el fin de estudiar la deformación permanente bajo las cargas de tráfico. El ensayo se realizó siguiendo las especificaciones BS 598 part 110: 1998 (BSI). Se fabricaron 12 muestras con el contenido óptimo de ligante obtenido del ensayo Marshall, 6 se acondicionaron y ensayaron a 45°C y las otras 6 se acondicionaron y ensayaron a 70°C. Se obtuvo una rodera de 2,4 mm a 45°C y de 12,2 mm a 70°C al final del ensayo. Puesto que la rodera máxima permitida por la especificación local es de 15 mm, se puede decir que las mezclas fabricadas con AR tuvieron una adecuada resistencia a la deformación permanente.

En el estudio de la resistencia a la deformación permanente llevado a cabo en Australia (Paranavithana et al., 2006) se realizó el ensayo de fluencia dinámica a 50°C siguiendo la norma AS 2891.12.1. Como ya se comentó anteriormente, en la investigación se prepararon una mezcla de control y una mezcla con AR en la fracción gruesa. En ambos casos se completó la granulometría con arena fina y se utilizó como polvo mineral (en este caso la fracción que pasa por el tamiz 0,075 mm) cal hidratada. Analizando la pendiente mínima del ensayo de fluencia ($\mu\epsilon/\text{ciclo}$) estos investigadores concluyeron que la fluencia aumenta con el contenido de ligante y disminuye con el aumento del esfuerzo de

compactación. Se observaron comportamientos similares entre las mezclas que presentaban AR y las mezclas convencionales.

En el análisis de la deformación permanente llevado a cabo en Singapur por Wong et al. (2007) se realizó un ensayo de fluencia dinámica a 50°C siguiendo, al igual que en el caso anterior, el Australian Standard Method 12.1. Como se indicó anteriormente estos investigadores fabricaron mezclas con granito y AR en porcentajes del 0%, 6% y 45% (calcinado y sin calcinar). Analizaron el número de ciclos de carga hasta acumular 10.000 microdeformaciones. Los resultados indicaron que reemplazar el polvo mineral granítico por el polvo mineral reciclado no afecta al comportamiento frente a las roderas de las mezclas. Así mismo obtuvieron que cuando se sustituye parte del árido fino granítico por AR, además del polvo mineral, se mejora el comportamiento a deformación permanente, siendo esta mejoría más acusada en el caso de los ARs calcinados. El análisis mediante microscopio electrónico de barrido permitió atribuir este hecho a que al presentar el AR una estructura más porosa llena de ligante confiere una mayor elasticidad a la mezcla.

Pérez et al. (2007, 2010) estudiaron la deformación permanente de dos tipos de mezclas bituminosas (S20 y G-20) fabricadas, como se comentó anteriormente, con distintos porcentajes de AR (0% y 50%) mediante el ensayo en pista de laboratorio a 60°C (NLT-173). Estos investigadores concluyeron que las mezclas fabricadas con un 50% de AR en todas las fracciones presentaban un buen comportamiento frente a las deformaciones plásticas, incluso mejor que las mezclas fabricadas exclusivamente con árido natural. Además, indicaron que esto podría deberse a la mayor cantidad de huecos de aire de las mezclas con AR. Posteriormente, Pérez et al. (2012a, 2012b) realizaron más ensayos de pista de laboratorio para analizar la influencia del porcentaje de AR (0%, 20%, 40% y 60%) y del tipo de polvo mineral (cemento frente a procedente del árido natural con un 1% de cal) sobre la deformación permanente. Como puede verse en la figura 4.25 todas las mezclas ensayadas cumplen con las especificaciones al respecto. En las mezclas en las que se utilizó cemento como polvo mineral, no hay una tendencia clara. En las mezclas con polvo mineral natural con un 1% de cal, a medida que aumenta el porcentaje de AR en la fracción gruesa, la resistencia a la deformación permanente disminuye.

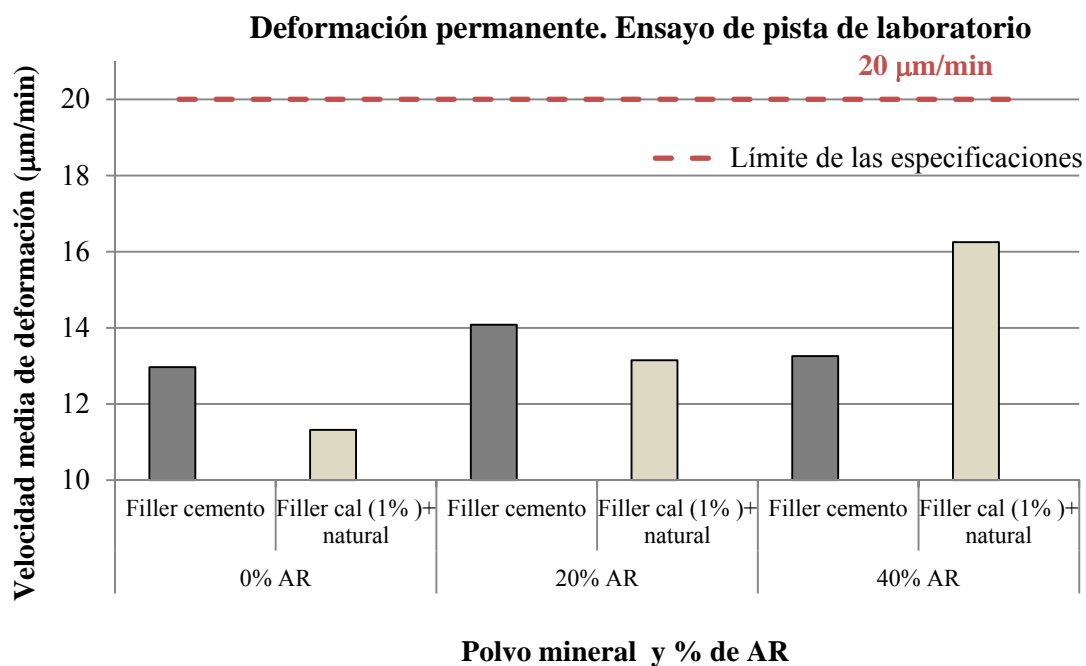


Figura 4.25.- Deformación permanente de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con sustitución parcial de árido natural por AR mediante el ensayo de pista de laboratorio. Fuente: elaboración propia a partir de Pérez et al. (2012a).

En Ankara, Gul (2008), realizó para su tesis doctoral un exhaustivo estudio sobre la formación de roderas en mezclas bituminosas en caliente fabricadas con sustitución parcial de ARs procedentes de descartes de probetas de hormigón fabricadas en laboratorio. Los porcentajes de sustitución fueron del 0%, 25%, 50% y 75%. Para ello llevó a cabo un ensayo uniaxial sin confinamiento de fluencia dinámica sobre probetas cilíndricas a una temperatura de 50°C, parecido al realizado por Wong et al. (2007). Estudió dos tipos de granulometría, a los que denominó “gruesa” y “fina”. La granulometría “fina” se encontraba en las proximidades del límite superior del huso granulométrico seleccionado; mientras que la “gruesa” se encontraba en las proximidades del límite inferior. Tal y como puede verse en la figura 4.26, analizando la deformación permanente a los 1.000 ciclos obtuvo que, generalmente, añadir AR a la mezcla con granulometría “gruesa”, mejoraba el comportamiento frente a la deformación permanente, mientras que añadirlo a la mezcla que presenta granulometría “fina” lo empeoraba.

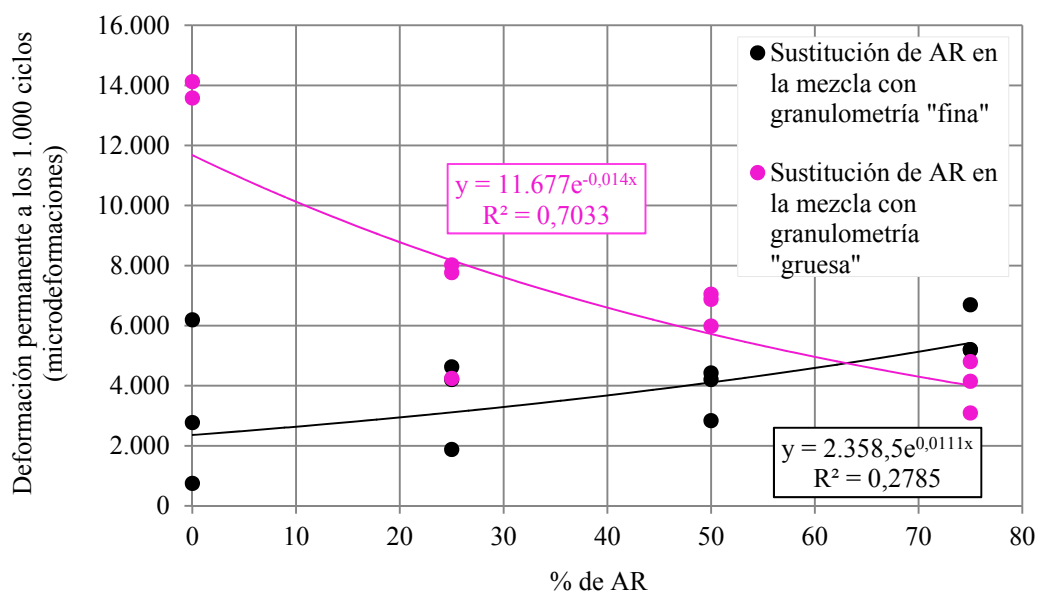


Figura 4.26.- Deformación permanente en función del porcentaje de sustitución de AR. Fuente: elaboración propia a partir de los datos extraídos de las investigaciones de Gul (2008).

En Michigan (USA) Mills-Beale y You (2010) analizaron las deformaciones permanentes de mezclas bituminosas fabricadas con AR para carreteras de bajo tráfico. Para ello emplearon el Asphalt Pavement Analyzer (APA) a 52°C, realizando el ensayo según la norma AASHTO TP 63-03. Mills-Beale y You (2010) trabajaron con porcentajes de sustitución de árido natural por AR del 25%, 35%, 50% y 75% y concluyeron que a medida que aumentaba el porcentaje de AR en la mezcla, también aumentaban las deformaciones permanentes, aunque en todos los casos se cumplían las especificaciones del Superpave al respecto.

En Brasil, Silva y Padula (2010) llevaron a cabo ensayos de pista de laboratorio siguiendo la norma francesa NF P 98-253-1. Llegaron a la conclusión de que las mezclas con AR de RCD (98% de AR y un 2% de cal hidratada como polvo mineral) son aptas para soportar las solicitaciones de las vías urbanas que, en general, según los autores, presentan un bajo tráfico. Además indicaron que estas mezclas resistían mejor la deformación permanente si se fabricaban con un betún de penetración 35/50 en lugar de con uno de penetración 60/70. Así mismo, indicaron que las mezclas con granulometría más cerrada presentaban un mejor comportamiento.

Chen et al. (2011) realizaron ensayos uniaxiales de fluencia dinámica a 60°C. Obtuvieron que mezclas de control fabricadas con árido basáltico y polvo mineral calizo comercial tenían una mayor deformación de fluencia y una menor rigidez que aquellas en las que el 100% del polvo mineral procedía de RCD. Por ello concluyeron que utilizar polvo mineral reciclado disminuye la susceptibilidad a la formación de roderas de las mezclas bituminosas en caliente a altas temperaturas.

A raíz de la revisión bibliográfica de las investigaciones sobre la resistencia a la deformación permanente de las mezclas bituminosas en caliente fabricadas con sustitución parcial de AR puede verse que se han obtenido conclusiones muy variadas. La mayor parte de los autores consideran que las mezclas fabricadas con AR cumplen con las especificaciones relativas a la deformación permanente (Aljassar et al., 2005; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Mills-Beale y You, 2010). Además, en algún caso, estas mezclas presentan comportamientos similares a las convencionales (Paranavithana et al., 2006) o incluso mejores. Este segundo caso se da cuando se utiliza AR como polvo mineral (Chen et al., 2011) o cuando se utiliza AR como sustituto del árido natural en otras fracciones granulométricas diferentes al polvo mineral (Shen y Du, 2004 y 2005; Wong et al., 2007). Pero también hay autores que señalan que a pesar de cumplir con las especificaciones, al ir aumentando el porcentaje de AR, la resistencia a la deformación permanente empeora (Mills-Beale y You, 2010). Otros indican que la mejoría o empeoramiento no depende solo de la presencia de AR sino que también depende de la granulometría de la mezcla (Gul, 2008).

4.3.6. Resistencia a la fatiga

Las solicitaciones debidas al tráfico son cargas de corta duración que soportan los firmes cada vez que un vehículo circula por la carretera. Si se aplica a un firme un número suficientemente elevado de solicitaciones de tráfico se puede producir el fenómeno de agotamiento por fatiga. Un material se fatiga cuando se produce la rotura del mismo con una sollicitación cuya magnitud es inferior a la resistencia a rotura del material frente a una carga individual. Esto es debido a la acumulación de los efectos de cada una de las cargas individuales.

El agotamiento por fatiga, que es uno de los principales modos de fallo de los firmes asfálticos (Di Benedetto et al., 2004), se manifiesta mediante la formación en la capa de

rodadura de una serie de fracturas interconectadas que forman pequeñas piezas. Este tipo de deterioro recibe el nombre de “piel de cocodrilo”.

En el modelo tradicional de fatiga la formación de grietas comienza en la parte inferior del firme bituminoso donde las tracciones son mayores. Estas grietas se propagan hacia la superficie del mismo como consecuencia de las tensiones horizontales de tracción debidas al paso sucesivo de los vehículos.

La resistencia a la fatiga es una de las propiedades menos estudiadas en las mezclas bituminosas fabricadas con AR. Pérez et al. (2007 y 2010) y Taibo et al. (2005 y 2006) emplearon los resultados del ensayo de flexotracción dinámica de fatiga en tres puntos (NLT-350) para llegar a la conclusión de que las mezclas bituminosas de tipo G-20 y S-20 fabricadas con AR se comportan de forma similar a las mezclas convencionales. Estos investigadores compararon las leyes obtenidas por ellos en el laboratorio, con las leyes contempladas por el Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y por la norma 6.1-IC de “Secciones de firmes” para el mismo tipo de mezclas. Pretendían con ello comparar los resultados y determinar si se la vida a fatiga de las mezclas fabricadas con AR se encontraba dentro del rango aceptable. Como puede observarse en la figura 4.27, para la granulometría G-20, la mezcla de control (0% de AR) y la mezcla fabricada con un 50% de AR en todas sus fracciones, presentaban leyes de fatiga similares entre sí. Además, por un lado, las leyes obtenidas en laboratorio fueron similares a una de las leyes consideradas por el CEDEX. Por otro lado, tanto la mezcla de control como la fabricada con AR, presentaban una vida a fatiga inferior a la ley de la norma 6.1-IC, pero superior a la otra ley considerada por el CEDEX. Por tanto la mezcla G-20 fabricada con AR presentaba una vida a fatiga incluida en el rango de los valores habituales para este tipo de mezcla. En cambio, puede verse en la figura 4.28, que para la granulometría S-20, la mezcla de control y la mezcla fabricada con AR, presentaban un comportamiento a fatiga diferente. En este sentido puede apreciarse que la mezcla fabricada con AR presentaba una ley de fatiga con una pendiente más acusada que la mezcla de control. Por tanto, a la vista de los resultados que se incluyen en la figura 4.28, estos investigadores concluyeron que la mezcla S-20 fabricada con árido natural se comportaba mejor a fatiga que la mezcla S-20 fabricada con AR. Sin embargo, también puntualizaron que ambas mezclas presentaban un comportamiento a fatiga aceptable.

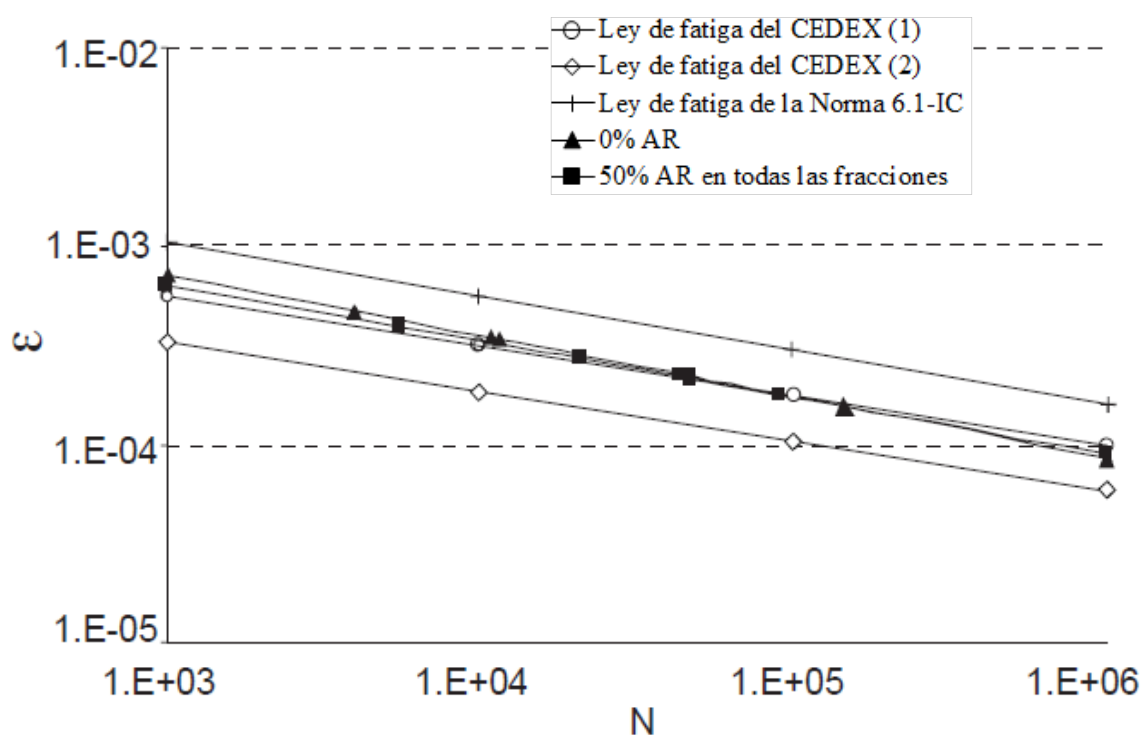


Figura 4.27.- Leyes de fatiga de las mezclas G-20. Fuente: Pérez et al. (2007).

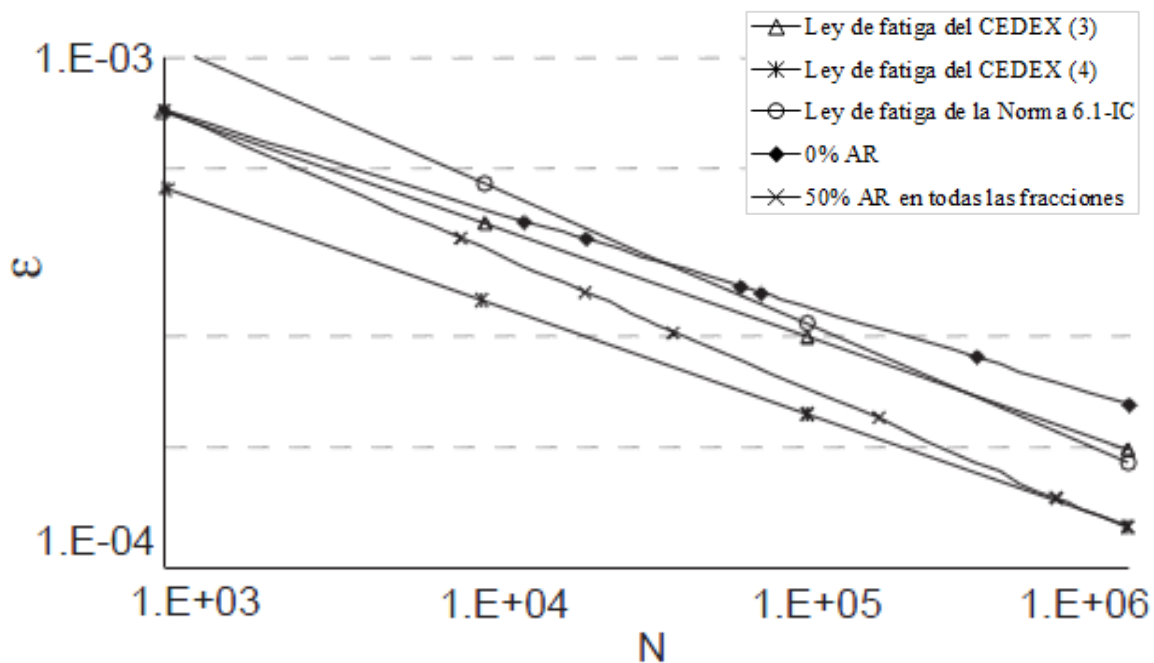


Figura 4.28.- Leyes de fatiga de las mezclas S-20. Fuente: Pérez et al. (2007).

Mediante los resultados del ensayo de fatiga en cuatro puntos a 20°C (AASHTO T-321), Chen et al. (2011) concluyeron que las mezclas bituminosas en las que se empleaba polvo mineral proveniente de RCD presentaban una mayor vida a fatiga (figura 4.29).

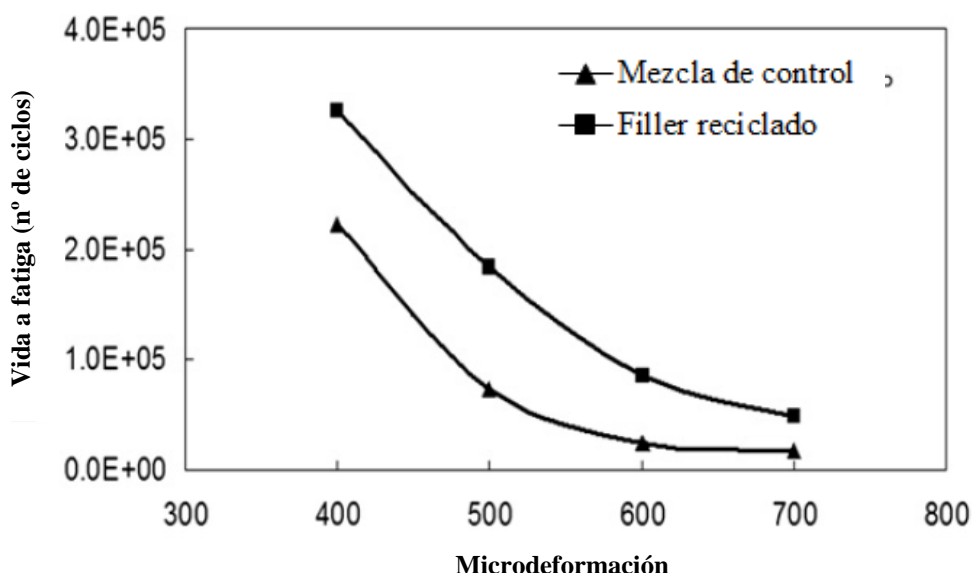


Figura 4.29.- Número de ciclos frente a microdeformación. Fuente: Chen et al. (2011).

A modo de resumen puede decirse que las mezclas fabricadas con sustitución parcial de AR se comportan a fatiga de forma similar a las convencionales (Taibo 2005 y 2006; Pérez et al. 2007 y 2010). La excepción se produce cuando la sustitución se produce en el polvo mineral. En ese caso la vida a fatiga mejora (Chen et al., 2011).

4.3.7. Comportamiento ante bajas temperaturas

Además de lo indicado en la figura 4.22, solo se ha estudiado este tipo de comportamiento en el caso de sustitución de polvo mineral calizo comercial por polvo mineral reciclado. En este sentido, Chen et al. (2011) llevaron a cabo ensayos de fatiga a flexotracción dinámica (AASHTO T-321) a una temperatura de -10°C. Como ya se ha comentado anteriormente, estos investigadores fabricaron una mezcla de control con árido basáltico y polvo mineral calizo comercial. Esta mezcla la compararon con una mezcla similar en la que se realizó la sustitución del polvo mineral calizo comercial por polvo mineral reciclado. Como resultado de este ensayo obtuvieron que la densidad de energía (J/m^3) era ligeramente inferior en la mezcla con polvo mineral reciclado. Por ello concluyeron que utilizar polvo mineral reciclado puede provocar un pequeño empeoramiento del comportamiento de las

mezclas bituminosas en caliente frente al agrietamiento a bajas temperaturas. Por tanto, el empleo de este tipo de polvo mineral sería más adecuado en regiones cálidas.

4.4. TRATAMIENTOS APLICADOS PARA LA MEJORA DE LAS PROPIEDADES DEL AR

Son pocos los investigadores que han experimentado con tratamientos que ayuden a mejorar las propiedades del AR. Con el fin de mejorar las propiedades del AR, Wong et al. (2007) lo sometieron a un proceso de calcinación: durante 1 hora subieron la temperatura del AR pasando de una temperatura inicial de 27°C a una temperatura final de 450°C; lo dejaron 1 hora a 450°C; volvieron a aumentar la temperatura del AR desde 450°C hasta 950°C, durando 1 hora el proceso de calentamiento; lo dejaron 2 horas a esa temperatura; finalmente enfriaron el AR hasta 27°C en 1 hora. En este proceso se obtuvo cal a partir de la calcita presente en el AR. Por tanto, se consiguió que polvo mineral obtenido de RCD presentase una cierta cantidad de cal, producto habitualmente utilizado para mejorar las propiedades de las mezclas bituminosas. Por otro lado Wong et al. (2007) determinaron que la calcinación del AR reducía el tamaño de los granos del mismo. Como se ha comentado anteriormente, los resultados de este pretratamiento fueron satisfactorios.

Otros investigadores (Mills-Beale y You, 2010) destacaron el comportamiento absorbente del AR bajo cargas dinámicas, indicando que la utilización de productos sellantes sería interesante de cara a minimizar la absorción de ligante de los áridos porosos, entre los que incluyen a los ARs. Puesto que, como se verá más adelante, en la presente tesis se utilizan pretratamientos consistentes en la aplicación de productos de sellado, se detallan a continuación dos de las investigaciones que utilizan estos productos para mejorar las propiedades del AR.

Lee et al. (2012) realizaron una preenvuelta con una pasta de cemento (figura 4.30) para reforzar el AR, debilitado como consecuencia de las pequeñas grietas que aparecen durante el proceso de machaqueo. El espesor óptimo de pasta de cemento resultó ser de 0,25 mm.



Figura 4.30.- AR preenvuelto con pasta de cemento. Fuente: Lee et al. (2012).

Los ARs preenvueltos con pasta de cemento con el espesor óptimo presentaron un menor coeficiente de Los Ángeles y una mayor resistencia. Lee et al. (2012) fabricaron mezclas bituminosas en caliente en las que el árido grueso natural se sustituyó por AR preenvuelto con el espesor óptimo de pasta de cemento en porcentajes del 25%, 50%, 75% y 100%. Las dosificaron mediante el ensayo Marshall empleando probetas cilíndricas compactadas con 50 golpes por cara. El contenido óptimo de ligante aumentaba con el incremento en el porcentaje de sustitución del AR; mientras que la Estabilidad Marshall disminuía (figura 4.31). Con los contenidos óptimos de ligante analizaron la resistencia a tracción indirecta según la norma ASTM 4123. Dicha resistencia aumentaba con el incremento del porcentaje de sustitución del AR y disminuía al aumentar la temperatura de ensayo. Como puede verse en la figura 4.32 el comportamiento frente al agua iba empeorando a medida que se aumentaba el porcentaje de AR en la mezcla. A pesar de ello, las mezclas demostraron tener una buena sensibilidad al agua, según las especificaciones taiwanesas. Así, superaron en todos los casos el mínimo exigido del 70% de resistencia conservada a tracción indirecta tras inmersión. En los ensayos de pista de laboratorio las mezclas demostraron tener una menor tendencia a deformarse a medida que se incrementaba el porcentaje de sustitución del AR preenvuelto.

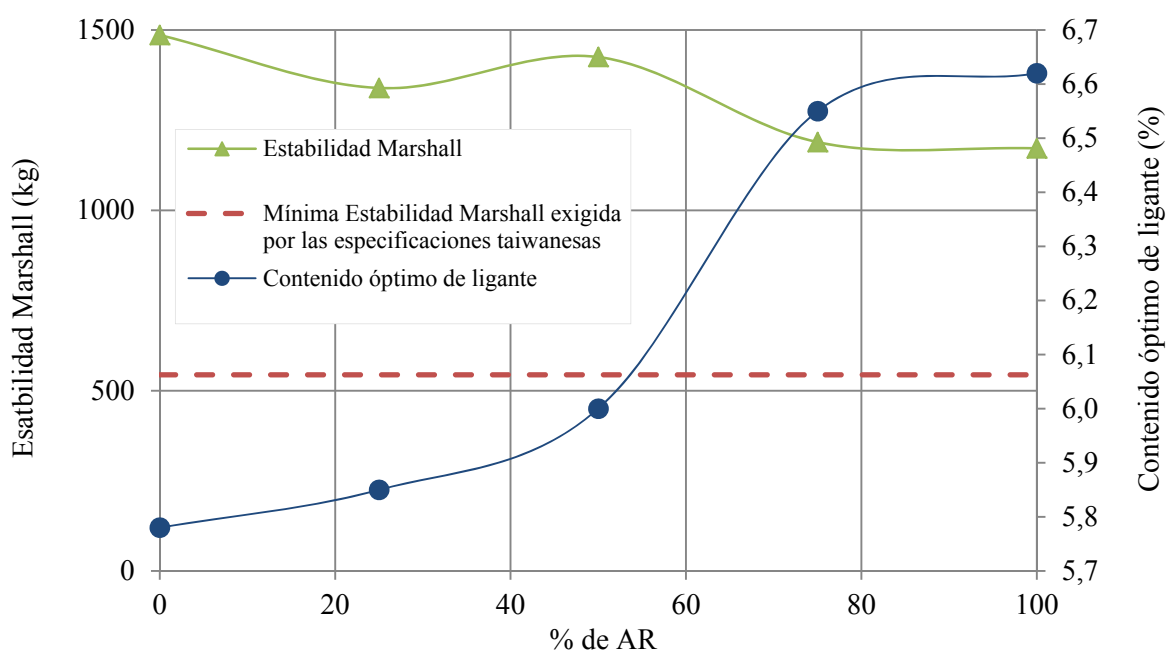


Figura 4.31.- Estabilidad Marshall y contenido óptimo de ligante en función del porcentaje de sustitución de árido natural por AR preenvuelto con pasta de cemento. Fuente: elaboración propia a partir de datos de Lee et al. (2012).

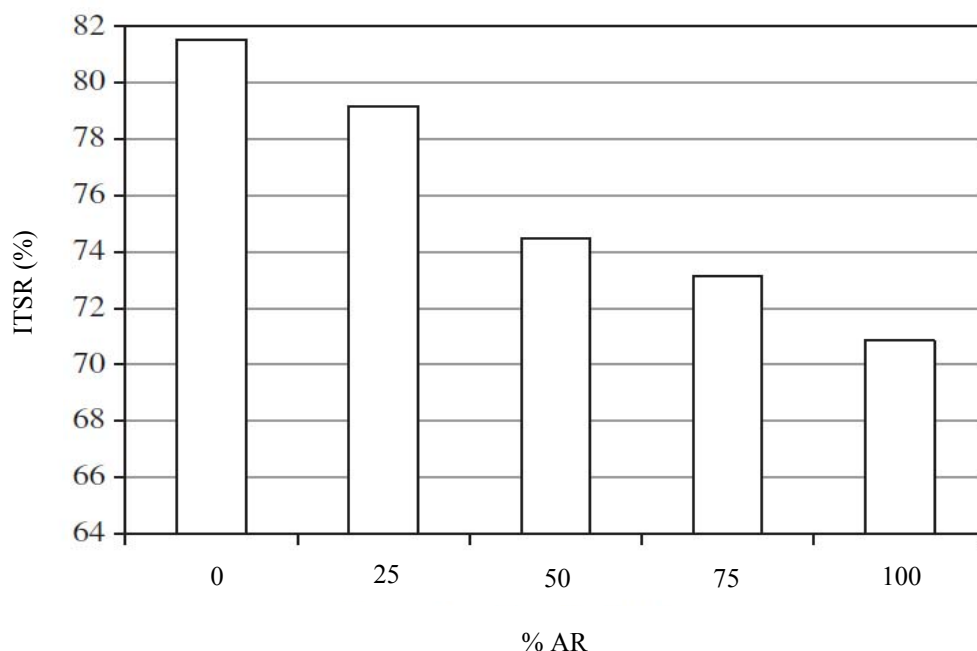


Figura 4.32.- Sensibilidad al agua en función del porcentaje de sustitución de árido natural por AR preenvuelto con pasta de cemento. Fuente: Lee et al. (2012).

Zhu et al. (2012a y 2012b) utilizaron AR procedente de la demolición de los edificios afectados por el terremoto de Wenchuan (China) para la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Como se puede ver en la figura 4.33, este AR está formado por un 71,20% de hormigón, un 26,16% de ladrillo y un 2,30% de materiales cerámicos. El resto son impurezas (madera, etc). Dada su composición, se esperaba una gran absorción y una mala resistencia del AR. Por ello se sometió al AR a un pretratamiento con una resina de silicona líquida patentada. La fracción gruesa del AR ($>4,75$ mm) se sumergió en la resina de silicona líquida durante 1 hora y se dejó en la estufa a 60°C durante 24 horas para su solidificación. Como árido natural utilizaron un árido calizo y como polvo mineral también uno de tipo calizo. Con un betún de 68 dmm de penetración, fabricaron cinco mezclas que se diferenciaban según la utilización del AR en la fracción fina ($<4,75$ mm) y/o en la fracción gruesa:

- 100% árido calizo (mezcla de control).
- AR tanto en la fracción gruesa como en la fina (FG:AR+FF:AR).
- AR solo en la fracción gruesa y árido calizo solo en la fina (FG:AR+FF:C).
- AR y árido calizo en la fracción gruesa (80% de AR y 20% de calizo) y árido calizo en la fracción fina (FG:AR-C+FF:C).
- AR pretratado con pasta de cemento y árido calizo en la fracción gruesa (80% de AR pretratado y 20% de calizo) y árido calizo en la fracción fina (FG:ARP-C+FF:C).

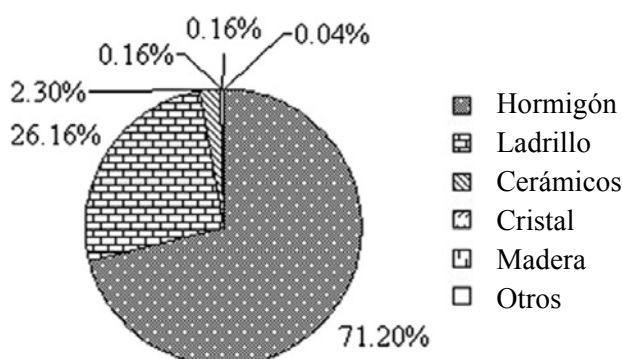


Figura 4.33.- AR procedente de la demolición de edificios dañados por el terremoto de Wenchuan (China).

Fuente: Zhu et al. (2012a).

El análisis de las propiedades físicas de los áridos realizado por Zhu et al. (2012a) permitió observar lo siguiente: con el pretratamiento, la absorción de agua de la fracción gruesa del AR y su coeficiente de Los Ángeles, disminuían. Por tanto, el pretratamiento mejora tanto la absorción del AR como su resistencia a la fragmentación. Además, estos investigadores realizaron ensayos del *boiling Water Test* de acuerdo con la norma china 052-2000 para estudiar el efecto del pretratamiento en la afinidad entre el árido y el ligante. En este sentido el pretratamiento mejoró la adhesividad de los restos de ladrillo y cerámicos presentes en el AR. Así, el AR pretratado cumplió con las especificaciones chinas al respecto, mientras que el AR sin pretratar no las cumplió. Posteriormente, Zhu et al. (2012a y 2012b) dosificaron las mezclas con ensayos Marshall según la norma china 052-2000. Obtuvieron que la absorción de ligante es menor con el pretratamiento (figura 4.34). En cambio, el contenido de ligante efectivo se mantiene constante (figura 4.34). Todo esto tiene su reflejo en el contenido óptimo de ligante: el pretratamiento con resina de silicona líquida, también lo reduce (figura 4.34).

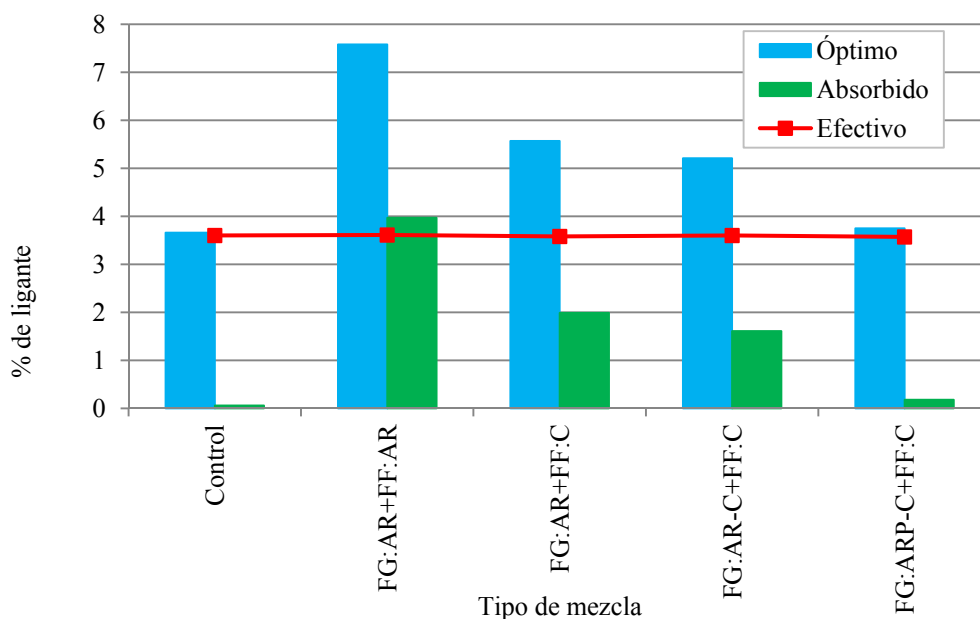


Figura 4.34.- Contenido óptimo de ligante, ligante efectivo y ligante absorbido. Fuente: elaboración propia según datos de Zhu et al. (2012a).

Para estudiar la sensibilidad al agua, Zhu et al. (2012a) llevaron a cabo dos tipos de ensayos según la norma china 052-2000: el análisis de la estabilidad residual Marshall tras varios ciclos de inmersión (un ciclo supone 48 horas de inmersión en agua a 60°C); y el análisis de la resistencia conservada a tracción indirecta tras varios ciclos de hielo y

deshielo (1 ciclo supone 16 horas a -18°C y 24 horas a 60°C). Estos investigadores observaron que la mezcla de control era la que ofrecía mayores valores de la estabilidad residual Marshall; mientras que la mezcla fabricada con AR en la fracción gruesa y en la fina era la que ofrecía los valores más bajos. El pretratamiento del AR mejoraba esta estabilidad residual, llegando a superar el límite del 80% en el primer ciclo de inmersión, exigido por las especificaciones chinas. De forma similar la mejor resistencia a conservada a tracción indirecta fue para la mezcla de control y la peor para la mezcla con AR en la fracción gruesa y en la fina. El pretratamiento del AR mejoraba también el valor de la resistencia conservada a tracción indirecta, superando el valor límite del 75% en el primer ciclo de hielo y deshielo exigido en las especificaciones chinas. Por tanto, de los resultados de ambos ensayos concluyeron que las mezclas con AR tenían una mayor sensibilidad al agua que las mezclas fabricadas íntegramente con árido natural y que el pretratamiento del AR mejoraba la sensibilidad al agua. En este sentido, las mezclas fabricadas con AR pretratado presentaron una resistencia a la acción del agua acorde con las especificaciones chinas.

Para el estudio de la deformación permanente Zhu et al. (2012a) también realizaron dos tipos de ensayo de acuerdo a la norma china 052-2000: fluencia dinámica y ensayo de pista de laboratorio, ambos a 60°C . En el ensayo de fluencia dinámica obtuvieron que la deformación permanente acumulada más baja se produjo en la mezcla fabricada con AR tanto en la fracción gruesa como en la fina. Además, la utilización de árido natural y la realización del pretratamiento al AR dieron lugar a mezclas con deformaciones permanentes acumuladas mayores. Así mismo, la pendiente media de deformación (deformación por cada ciclo de carga) más baja se produjo para la mezcla con AR en la fracción gruesa y en la fina. Con la utilización de árido natural esta pendiente aumentaba. Además, la realización del pretratamiento al AR provocó un aumento sustancial de esta pendiente. Por todo ello, la mezcla que presentó mejor resistencia frente a las deformaciones permanentes fue la que presentaba AR en ambas fracciones, es decir, la gruesa y la fina. Estos resultados se vieron confirmados con los obtenidos en el ensayo de pista de laboratorio. Sin embargo, Zhu et al. (2012a) indicaron que a pesar de todo ello, todas las mezclas tenían un comportamiento aceptable frente a las deformaciones permanentes a elevadas temperaturas.

Finalmente Zhu et al. (2012a) también estudiaron la resistencia de las mezclas a la fisuración térmica. Para ello realizaron el ensayo de fatiga a flexotracción dinámica sobre probetas prismáticas apoyadas en tres puntos, siguiendo la norma china 052-2000, a una temperatura de ensayo de -10°C. Llegaron a la conclusión de que la mezcla con AR en la fracción gruesa y en la fina era la que peor comportamiento tenía frente a la fisuración a bajas temperaturas. La utilización del pretratamiento mejoró sustancialmente este comportamiento. Así, la mezcla fabricada con AR pretratado, fue la única, además de la mezcla de control, que superó las especificaciones chinas al respecto. Zhu et al. (2012) concluyeron que con la mezcla con AR pretratado en la fracción gruesa, era adecuada desde el punto de vista técnico.

4.5. COMBINACIÓN DE AR DE TIPO HORMIGÓN CON ESCORIAS DE ACERÍA

Arabani y Azarhoosh (2012) utilizaron AR de RCD y escorias de acería como árido para fabricar mezclas bituminosas, junto con el árido natural (dacita). Ensayaron seis mezclas con diferentes materiales en la fracción gruesa (57% del total) y en la fracción fina (37% del total):

- 100% dacita (mezcla de control).
- AR en la fracción gruesa y dacita en la fina (FG:AR+FF:D).
- Dacita en la fracción gruesa y AR en la fina (FG:D+FF:AR).
- Escorias de acería en la fracción gruesa y dacita en la fina (FG:EA+FF:D).
- Dacita en la fracción gruesa y escorias de acería en la fina (FG:D+FF:EA).
- Escorias de acería en la fracción gruesa y AR en la fina (FG:EA+FF:AR).

Todas las mezclas utilizaron un 6% de polvo mineral (dacita) y un betún de penetración 60/70. Para determinar los contenidos óptimos de ligante se llevó a cabo el ensayo Marshall con 75 golpes por cara, siguiendo la norma ASTM D1559. La resistencia a la deformación permanente se evaluó realizando ensayos de fluencia dinámica a 40°C. Para el estudio de la rigidez se determinó el módulo resiliente sobre probetas cilíndricas a tracción indirecta a 25°C. Así mismo estudiaron la fatiga a tracción indirecta a 25°C.

Como resultado, Arabani y Azarhoosh (2012) obtuvieron que cuando el AR se usa en la fracción fina y las escorias de acería se usan en la fracción fina o gruesa, la estabilidad Marshall aumenta y la deformación Marshall disminuye (tabla 4.7). Además, la mezcla con AR en la fracción fina y escorias de acería en la gruesa fue la que tuvo un módulo Marshall más elevado (tabla 4.7) y, por tanto, un mejor comportamiento ante las deformaciones permanentes y los esfuerzos cortantes.

Mezcla	Estabilidad (kN)	Deformación (mm)	Módulo (kN/mm)
Control	16,97	2,95	5,75
FG:AR+FF:D	12,97	3,24	4,00
FG:D+FF:AR	19,46	2,67	7,29
FG:EA+FF:D	20,23	2,51	8,06
FG:D+FF:EA	17,12	2,81	6,09
FG:EA+FF:AR	22,81	2,30	9,91

Tabla 4.7.- Parámetros Marshall de las mezclas fabricadas con AR y escorias de acería. Fuente: Arabani y Azarhoosh (2012).

Como consecuencia de la mayor angularidad de los ARs y de las escorias de acería, las mezclas con AR en la fracción fina y escorias de acería en la fracción fina o en la gruesa, mostraron el mejor comportamiento ante las deformaciones permanentes. Así se obtuvieron deformaciones un 40% inferiores a las de la mezcla de control. A pesar de su mayor angularidad, si el AR se utilizaba en la fracción gruesa, las mezclas mostraban un peor comportamiento ante la deformación permanente (figura 4.35). Estos investigadores indicaron que esto fue así como consecuencia de la presencia del mortero adherido, con una resistencia a la abrasión relativamente baja.

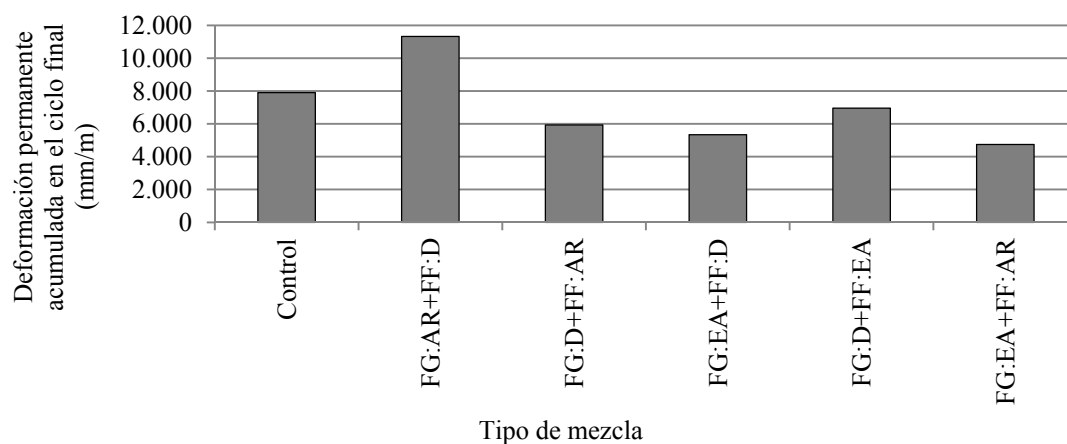


Figura 4.35.- Deformación permanente en el ciclo 2.000 en mezclas fabricadas con AR y escorias de acería. Fuente: elaboración propia a partir de Arabani y Azarhoosh (2012).

La angularidad de los ARs y de las escorias de acería nuevamente es la responsable de la elevada rigidez de la mezcla con AR en la fracción fina y escorias de acería en la gruesa. Esta mezcla presentó un módulo resiliente 2,35 veces superior al de la mezcla de control (tabla 4.8).

Mezcla	Módulo resiliente (MPa)
Control	948
FG:AR+FF:D	1.365
FG:D+FF:AR	793
FG:EA+FF:D	1.084
FG:D+FF:EA	1.896
FG:EA+FF:AR	2.228

Tabla 4.8.- Resultados del ensayo de rigidez a tracción indirecta de las mezclas fabricadas con AR y escorias de acería. Fuente: Arabani y Azarhoosh (2012).

En cuanto a la fatiga, también fue la mezcla con AR en la fracción fina y escorias de acería en la fracción gruesa, la que mostró el mejor comportamiento. La formación de polvo mineral de cemento como consecuencia de la rotura del mortero de cemento adherido provoca un mayor contenido de polvo mineral en la mezcla y una reducción en sus huecos de aire. Esta es una de las razones que Arabani y Azarhoosh (2012) aducen para justificar el mejor comportamiento a fatiga de esta mezcla. Además la utilización de AR y escorias de acería aumenta el contenido óptimo de ligante, que está directamente relacionado con la vida a fatiga de las mezclas.

4.6. SÍNTESIS

El AR procedente de RCD se diferencia fundamentalmente de los áridos naturales en que presenta mortero adherido (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009). La presencia de mortero y de diversas impurezas, así como la debilidad del contacto entre el árido natural y el mortero de cemento, unida a la aparición de pequeñas fisuras como consecuencia del proceso de machaqueo, son las principales causas aducidas por los investigadores para justificar la pérdida de calidad del AR frente al árido natural (Cupo-Pagano et al., 1994; Paravithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Tam et al., 2007; Gul, 2008; Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009; Lee et al., 2012). En este sentido la diferencia más acusada de los ARs procedentes de RCD con los naturales es que los primeros presentan una mayor absorción de agua y una menor densidad (Cupo-Pagano et al., 1994; Shen y Du, 2004 y 2005; Paravithana et al., 2006; Pérez et al., 2007, 2010,

2012a y 2012b; Wong et al., 2007; CEDEX, 2010; Cho et al., 2011; Rafi et al., 2011). Aunque también difieren en otras propiedades, presentando por ejemplo una menor resistencia a la fragmentación (Shen y Du, 2004 y 2005; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Rafi et al., 2011) y una cierta inestabilidad granulométrica (Paranavithana et al., 2006; Gul, 2008; Cho et al., 2011; Muniz de Farias et al., 2012; Arabani y Azarhoosh, 2012). La diferencia entre las propiedades del AR y el natural condiciona el comportamiento de las mezclas bituminosas fabricadas con sustitución parcial de AR, destacando en general las siguientes observaciones:

- Mayor contenido óptimo de ligante (Shen y Du, 2004 y 2005; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b; Wong et al., 2007; Rafi et al., 2011; Bushal et al., 2011; Muniz de Farias et al., 2012), en particular cuando la sustitución tienen lugar en la fracción fina (Bushal et al. 2011; Rafi et al., 2011). Algunos investigadores indican que, como consecuencia del mayor contenido óptimo de ligante, el coste de estas mezclas será mayor (Bushal et al., 2011). Sin embargo, como ya se ha comentado, hay que tener presente que su densidad es menor. Por ello, para un espesor dado de mezcla bituminosa, con las mezclas fabricas con AR se necesita un menor peso que con las mezclas convencionales, con el consiguiente ahorro (Petrarca y Galdiero, 1984).
- Variabilidad en los resultados obtenidos por los diferentes investigadores de las distintas propiedades tanto de sensibilidad al agua como de deformación permanente, rigidez y fatiga. En este sentido reviste una especial importancia el estudio de la sensibilidad al agua. Como se ha comentado anteriormente, una mala sensibilidad al agua es indicativo de una mala durabilidad de la mezcla, de tal forma que podría no ser utilizable en firmes de carreteras.
- El origen de los ARs utilizados en las diferentes investigaciones y el tipo de árido natural con el que se combina parece ser la causa de esta variabilidad en los resultados. Por tanto es preciso realizar un minucioso estudio de todas estas propiedades cada vez que se analice un tipo de AR y de árido natural en particular.
- Mejor comportamiento de las mezclas fabricadas con ARs que han sufrido algún tipo de tratamiento (Wong et al., 2007; Lee et al., 2012; Zhu et al., 2012a y 2012b).

Por el momento, los resultados son bastante alentadores. Sin embargo, la mayor parte de los investigadores insisten en la necesidad de una mayor investigación. Por tanto, para poder afirmar que el AR de tipo hormigón procedente de RCD se puede utilizar en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente, se precisa de un mayor conocimiento del comportamiento de este tipo de mezclas, tanto de laboratorio como de campo. Así, el fin último de la presente tesis es el de contribuir a entender mejor el comportamiento de este tipo de mezclas. En particular, como ya se ha comentado, resulta fundamental analizar de forma exhaustiva la sensibilidad al agua de las mezclas fabricadas con AR, para evitar que una mala resistencia a la acción del agua de las mismas impida su utilización en los firmes de carreteras, como consecuencia de una inadecuada durabilidad.

Capítulo 5

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES BÁSICOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha mencionado anteriormente, en la presente tesis se investiga la posibilidad de utilizar áridos reciclados (ARs) procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente dispuestas en capas de base de firmes de carreteras. Para su elaboración es necesario disponer de áridos (reciclados y naturales), ligante, filler o polvo mineral y, de forma opcional, aditivos para mejorar las propiedades de la mezcla. Para ahondar en el conocimiento de todos estos materiales, analizar la idoneidad de los mismos a efectos de fabricar mezclas bituminosas y comprobar el cumplimiento de las especificaciones contenidas en el “Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes” (Ministerio de Fomento, 2008), en adelante PG-3, se ha llevado a cabo la realización de una serie de ensayos de caracterización en el Laboratorio de Caminos de la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la Universidade da Coruña.

También, y con el fin de estudiar con mayor profundidad los materiales utilizados, se han realizado ensayos de difracción y fluorescencia de rayos X sobre diferentes muestras de áridos, llevados a cabo por la Unidad de Análisis Estructural (UAE) del Servicio de Apoio á Investigación de la Universidade da Coruña.

Se han estudiado cuatro áridos naturales (corneana o cornubianita, gabro, calcita dolomítica y esquisto feldespático) y un único tipo de árido reciclado (AR). De los áridos se han estudiado sus propiedades mecánicas y físicas (resistencia a la fragmentación, densidad de las partículas y absorción de agua), sus propiedades geométricas (forma de las partículas, caras de fractura, limpieza mediante el equivalente de arena) y su composición química y fases cristalinas mediante los ensayos de fluorescencia y difracción de rayos X. Adicionalmente, en los ARs se ha llevado a cabo el estudio de otra propiedad geométrica: la clasificación de los componentes de los áridos gruesos. También exclusivamente en los ARs se ha llevado a cabo un estudio de la granulometría con el fin de comprobar que se dispone de los tamaños de árido adecuados para fabricar mezclas bituminosas en caliente. Respecto al ligante, se han caracterizado tres tipos de betún de penetración (B35/50, B50/70 y B160/220), llevándose a cabo ensayos de penetración, anillo y bola y densidad. Otras características de los betunes (punto de fragilidad de Fraas, solubilidad en tolueno, etc) fueron suministradas por el fabricante. En el caso de los polvos minerales y aditivos la

totalidad de las características también fueron facilitadas por el fabricante. Como resultado de la caracterización se obtuvo el árido natural más adecuado, así como la fracción de AR más apropiada para su empleo en mezclas bituminosas en caliente. Tras los ensayos de caracterización, también se determinó si era necesario o no eliminar impurezas de los ARs.

Se describen a continuación los materiales utilizados, comentando los ensayos que se han realizado y su adecuación a la normativa vigente.

5.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS NATURALES

Los áridos naturales empleados se han obtenido de diversas canteras de la Comunidad Autónoma de Galicia. Se han seleccionado cuatro canteras cuyos áridos se emplean de forma habitual en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Como se mencionó anteriormente se ha seleccionado una corneana, un gabro, una calcita dolomítica y un esquisto feldespático. Se han escogido litologías de origen y composiciones mineralógicas diferentes, con el fin de realizar posteriormente ensayos de afinidad cuyos resultados puedan ser extrapolables a cualquier tipo de árido natural.

5.2.1. Propiedades mecánicas y físicas

5.2.1.1. Resistencia a la fragmentación. Coeficiente de Los Ángeles

Como se ha visto en el capítulo 4, en el AR el valor del coeficiente de Los Ángeles (LA) suele ser elevado como consecuencia de la presencia de mortero adherido. Por ello, para utilizarlo en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente es preciso combinarlo con árido natural. Por consiguiente este último debe ofrecer valores lo más bajos posibles del LA. Por este motivo se comienza analizando el valor del LA para los cuatro áridos naturales disponibles (tabla 5.1), según la norma UNE-EN 1097-2:1999/A1:2007 “Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación” (AENOR, 2007a):

Tipo de árido	LA (%)
Corneana	14,2
Gabro	20,0
Calcita	24,1
Esquisto	22,1

Tabla 5.1.- Coeficiente de Los Ángeles de los áridos naturales.

Según el PG-3, el valor del LA debe ser inferior a 25% para capa de base y tráfico T00. Como puede verse (tabla 5.1) los cuatro áridos naturales cumplen para tráfico T00, siendo la corneana, con un LA de 14,2%, el que presenta una mejor resistencia a la fragmentación.

Dado que el valor de LA obtenido para la **corneana** es el más bajo de todos los áridos naturales estudiados, **se ha optado por seleccionar este árido como el más adecuado para combinarlo con el AR**. Por ello, la caracterización de áridos naturales se centra, a partir de ahora, en la corneana.

5.2.1.2. Densidad de las partículas y absorción de agua

Aunque como se acaba de comentar, la caracterización de los áridos naturales se centra en la corneana, la densidad de las partículas y la absorción de agua se han determinado para los cuatro áridos naturales. Así se puede obtener una amplia muestra de valores de estas dos propiedades con la que poder comparar los resultados que se obtengan posteriormente para el AR. Se ha optado por estudiar en profundidad estas dos propiedades, ya que, según ha podido verse en la revisión bibliográfica realizada en el capítulo 4, son las propiedades en las que más difieren los áridos naturales y los reciclados. Además, el valor de la densidad de todos los áridos naturales es necesario para poder calcular las cantidades de ligante que se precisan para realizar el análisis de la afinidad entre el árido y el ligante (capítulo 6).

Para determinar la densidad y absorción de agua se siguió el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 1097-6 “Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua” (AENOR 2001 y 2006b). De este ensayo se obtiene la densidad aparente de las partículas (ρ_a), la densidad de partículas tras secado en estufa (ρ_{rd}), la densidad de partículas saturadas con la superficie seca (ρ_{ssd}) y la absorción de agua tras inmersión durante 24 horas (WA_{24}).

Como puede verse en las tablas 5.2 a 5.3 la densidad de las partículas y la absorción de agua varía en función del árido estudiado y de la fracción escogida del mismo. En este sentido se han escogido las fracciones a estudiar en función de cómo venía suministrado el árido de la cantera. Así para la densidad aparente de las partículas se obtienen valores que oscilan entre 2,46 g/cm³ (fracción 0,063/4 mm de la calcita dolomítica) y 2,87 g/cm³

(fracción 6,3/12,5 mm del gabro) y para la absorción de agua entre 0,39% (fracción 0,063/4 mm del esquisto feldespático) y 1,67 % (fracción 2/4 mm de la corneana).

Fracción	0/2	2/4	4/6,3	4/8	6,3/12,5	10/16	16/31,5
ρ_a (g/cm ³)	2,74	2,78	2,78	2,79	2,79	2,77	2,79
ρ_{rd} (g/cm ³)	2,69	2,66	2,69	2,71	2,72	2,73	2,74
ρ_{ssd} (g/cm ³)	2,71	2,71	2,72	2,74	2,74	2,74	2,76
WA ₂₄ (%)	0,79	1,67	1,25	1,08	0,92	0,60	0,62

Tabla 5.2.- Densidad y absorción de la corneana.

Árido	Fracción	0,063/4	4/6,3	6,3/12,5	4/8	8/25	12,5/20	20/31,5
Gabro	ρ_a (g/cm ³)	-	-	2,87	-	-	-	-
	ρ_{rd} (g/cm ³)	-	-	2,80	-	-	-	-
	ρ_{ssd} (g/cm ³)	-	-	2,82	-	-	-	-
	WA ₂₄ (%)	-	-	0,79	-	-	-	-
Calcita	ρ_a (g/cm ³)	2,46	-	-	2,83	2,82	-	-
	ρ_{rd} (g/cm ³)	2,43	-	-	2,74	2,76	-	-
	ρ_{ssd} (g/cm ³)	2,45	-	-	2,77	2,78	-	-
	WA ₂₄ (%)	0,45	-	-	1,14	0,86	-	-
Esquisto	ρ_a (g/cm ³)	2,83	2,74	2,68	-	-	2,63	2,68
	ρ_{rd} (g/cm ³)	2,80	2,70	2,61	-	-	2,57	2,60
	ρ_{ssd} (g/cm ³)	2,81	2,71	2,64	-	-	2,59	2,63
	WA ₂₄ (%)	0,39	0,62	0,91	-	-	0,85	1,11

Tabla 5.3.- Densidad y absorción del gabro, la calcita dolomítica y el esquisto feldespático.

5.2.2. Propiedades geométricas

5.2.2.1. Forma de las partículas. Índice de lajas

Con el fin de determinar la forma del árido grueso, se ha llevado a cabo la realización del índice de lajas, según la norma UNE-EN 933-3. “Determinación de la forma de las partículas. Índice de Lajas” (AENOR, 1997 y 2004a).

El índice de lajas global de la muestra (I_L) de corneana es del 16%; mientras que el mayor índice de lajas se obtiene para la fracción 5/6,3 mm, con un valor del 24%. Puesto que el PG-3 indica que para las categorías de tráfico pesado T0 a T31 el índice de lajas de las distintas fracciones deberá ser menor o igual que 25%, la corneana cumple para dichas categorías.

Por otro lado, el suministrador indica que los índices de lajas de las distintas fracciones son aptos para categorías de tráfico pesado T00, excepto en el caso de la fracción 2/6,3 que sería apta para T0 a T2. Además, indica que hay experiencias satisfactorias sobre la utilización de este tipo de árido en mezclas bituminosas en caliente para categorías de tráfico pesado T00.

5.2.2.2. Porcentaje de caras de fractura del árido grueso

Para determinar la proporción de caras de fractura se siguió la norma UNE-EN 933-5 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso” (AENOR, 1999a y 2005).

Fracción granulométrica:	4/6,3	6,3/12,5	10/16	16/31,5
Porcentaje de partículas trituradas, Cc:	100,0	100,0	100,0	100,0
Porcentaje de partículas totalmente trituradas, Ctc:	62,8	39,7	0,0	28,9
Porcentaje de partículas redondeadas, Cr:	0,0	0,0	0,0	0,0
Porcentaje de partículas totalmente redondeadas, Ctr:	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 5.4.- Caras de fractura del árido procedente de la corneana.

En el PG-3 se indica que para la categoría de tráfico pesado T00, el porcentaje de partículas trituradas debe ser igual que el 100% y el de partículas totalmente redondeadas, igual al 0%. Por consiguiente, como puede verse en la tabla 5.4, el árido procedente de la corneana cumple para la categoría de tráfico pesado T00.

5.2.2.3. Evaluación de los finos. Equivalente de arena

Se ha utilizado la norma UNE-EN 933-8 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena” (AENOR, 2000), con el fin de determinar el valor del equivalente de arena (SE) de la fracción 0/2 mm de la corneana y estudiar así su limpieza.

Se obtuvo un resultado del 61%, que cumple con el valor estipulado por el PG-3, que exige que el equivalente de arena de los áridos para fabricar mezclas bituminosas en caliente sea superior a 50%.

5.2.3. Composición química y fases cristalinas

A partir de ensayos de fluorescencia y difracción de rayos X sobre fracciones de tamaño 8/11,2 mm de los distintos áridos naturales estudiados, se ha podido identificar respectivamente la composición química y las fases cristalinas presentes en cada uno de los cuatro tipos de árido utilizados. Para la realización de ambos ensayos fue preciso moler las diferentes muestras hasta conseguir un tamaño de grano inferior a 63 μm y compactarlas en forma de pastilla para poder proceder a su análisis. Para el ensayo de fluorescencia de rayos X se utilizó un espectrómetro Bruker S4 Pioneer Fluorescence. Una muestra de cada material fue expuesta a un haz de fotones de alta energía (rayos X) y se analizó el espectro de energías emitido por los fotones para cada muestra. Para el ensayo de difracción de rayos X se utilizó un difractómetro Siemens D5000. En este ensayo las muestras también se irradiaron con rayos X. Los rayos X difractados fueron interceptados por los detectores del difractómetro y su intensidad y posición se analizaron mediante ecuaciones matemáticas.

Referencia del árido	Corneana	Gabro	Calcita dolomítica	Esquisto feldespático
Litología	Metamórfica de tipo silíceo y naturaleza gnéissica	Ígnea	Sedimentaria	Metamórfica
Roca	Corneana	Gabro	Calcita	Esquisto
% de SiO_2 (*)	62,30	49,20	16,10	72,06
% de CaO (*)	0,32	9,58	32,29	0,50

(*) Según fluorescencia de rayos X.

Tabla 5.5.- Porcentaje de sílice y óxido de calcio en los áridos naturales.

Puesto que a efectos de la afinidad entre el árido y el ligante es importante conocer la naturaleza caliza o silícea de los áridos naturales empleados, se ha llevado a cabo el estudio para la totalidad de los áridos naturales. En la tabla 5.5 aparece reflejado el porcentaje respecto al peso total de SiO_2 (sílice) y CaO (óxido de calcio). A la vista de los resultados obtenidos puede verse que tres de los áridos son de naturaleza predominantemente silícea (la corneana, el gabro y el esquisto feldespático) y uno de naturaleza caliza (calcita dolomítica). Se espera que los áridos de tipo silíceo arrojen peores resultados de adhesividad que los de tipo calizo, tanto peores cuanto mayor sea su porcentaje de sílice. Por tanto, el esquisto feldespático debería ser el que obtuviese peores resultados; mientras

que la calcita debería ser el que obtenga mejores resultados de cara a la afinidad entre el árido y el ligante. En el capítulo siguiente puede verse el estudio de afinidad realizado.

En el caso de la corneana se adjuntan a continuación los resultados obtenidos para la fluorescencia (figura 5.1) y difracción de rayos X. Se ha encontrado cuarzo, feldespato de tipo plagioclasa, micas y clorita-serpentina dentro de las fases cristalinas. Por otro lado, como se acaba de ver, el sílice (SiO_2) es el componente químico mayoritario de la corneana, con un 62,3% en masa. A continuación vendría la alúmina (Al_2O_3) con un 19,0%. Por tanto, se espera que este árido no presente una buena adhesividad con el ligante.

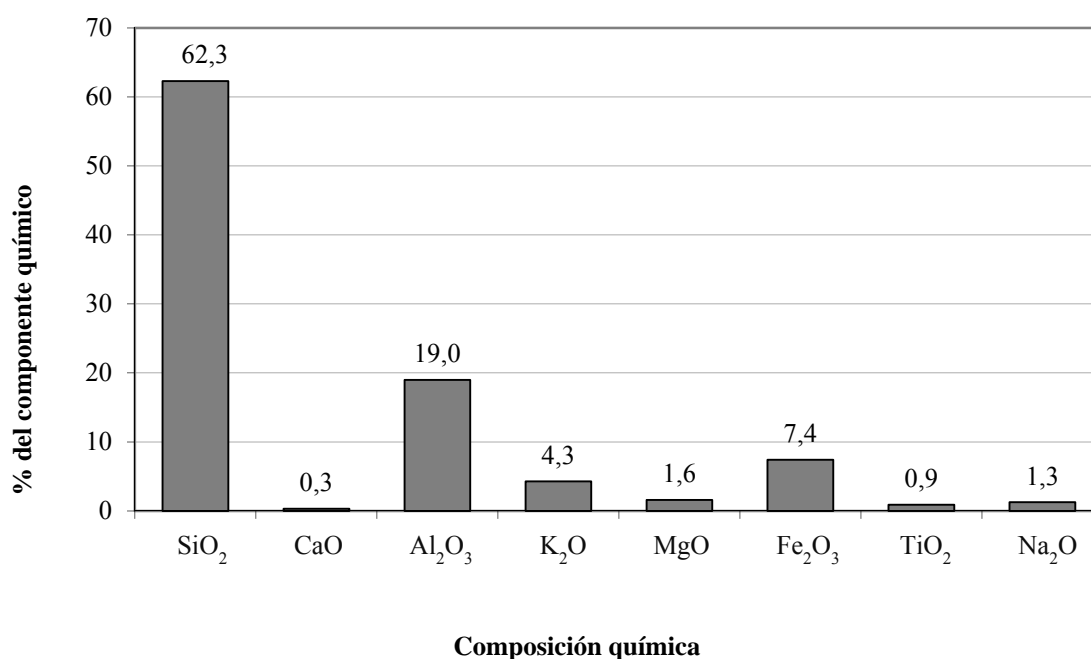


Figura 5.1.- Composición química de la corneana.

5.3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁRIDO RECICLADO

Los ARs proceden de la planta de gestión y reciclado de RCD que la empresa TEC REC (Tecnología y Reciclado, S.L.) tiene ubicada en la carretera de Valdemingómez, en el PK 0+700, en la Comunidad de Madrid. Se trata de una planta de primera generación, en la que el material procedente de RCD se somete a un proceso de cribado y machaqueo y a una separación magnética. Mediante este conjunto de actuaciones se obtiene AR para diferentes aplicaciones. Se incluyen a continuación una serie de imágenes (figuras 5.2 a 5.4) en las que pueden verse algunos detalles de la planta de reciclado.



Figura 5.2.- RCD depositados en la planta de gestión y reciclado.



Figura 5.3.- Cabina de triaje.



Figura 5.4.- Armaduras extraídas mediante separador magnético.



Figura 5.5.- Detalle del AR (ZA25).

La planta suministró la fracción 0/40 mm, correspondiente a la granulometría de una zahorra artificial, ZA25 (figura 5.5), por lo cual se tuvo que trabajar con esa fracción. Se trasladó a A Coruña en camión para proceder a su caracterización. Allí se almacenó en big-bags. En el laboratorio, con anterioridad a la realización de ensayos, se sometió al árido a un proceso de cuarteo (figura 5.6), cribado y lavado. Se obtuvieron así las fracciones adecuadas y la limpieza suficiente como para poder utilizarlo en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente y en la realización de ensayos.



Figura 5.6.- Cuarteo de un big-bag de AR procedente de RCD.

5.3.1. Granulometría del AR

La granulometría se determinó de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1 “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado” (AENOR 1998 y 2006a).

En la figura 5.7 se representa la curva granulométrica obtenida para la fracción 0/40 mm, por el procedimiento de lavado y tamizado. Puede observarse que la fracción 0/40 mm presenta una granulometría continua. Así, el AR se encuentra uniformemente graduado, de

tal forma que todos los tamices retienen árido, existiendo una variación escalonada de los tamaños. Dado que la curva granulométrica obtenida indica una buena distribución de los diferentes tamaños se podrá disponer de AR de cualquier fracción granulométrica que se escoja para posteriormente fabricar mezclas bituminosas en caliente.

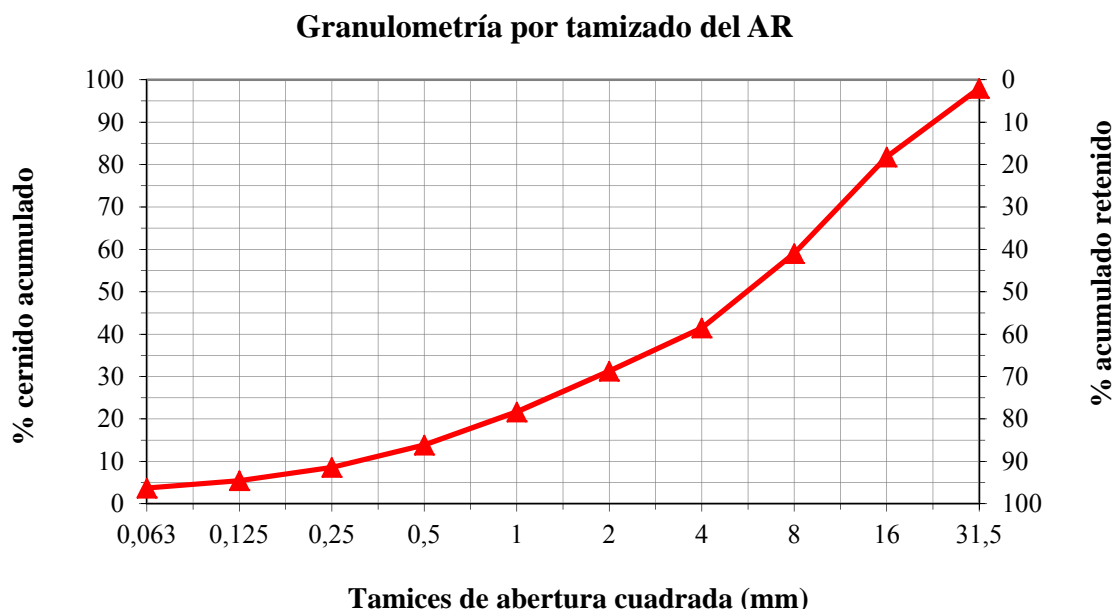


Figura 5.7.- Curva granulométrica de la fracción 0/40 mm de los ARs.

5.3.2. Propiedades mecánicas y físicas

5.3.2.1. Resistencia a la fragmentación. Coeficiente de Los Ángeles del AR

Se obtuvo un coeficiente de Los Ángeles (LA) del 32%, lo cual hace que el AR sin combinar con ningún tipo de árido natural, sea apto para fabricar mezclas bituminosas para una categoría de tráfico pesado baja, la T4, según se indica en el PG-3. Tal y como se ha comentado en el estado del arte, el mortero adherido es el principal responsable del elevado LA obtenido.

5.3.2.2. Resistencia a la fragmentación. Coeficiente de Los Ángeles combinado del árido natural y AR

La baja resistencia a la fragmentación del AR obligará a combinarlo con un árido natural con un LA bajo durante la fabricación de mezclas bituminosas. Así, la mezcla de áridos (reciclado y natural) presentará una resistencia a la fragmentación que permitirá fabricar mezclas para categorías de tráfico pesado superiores a la obtenida utilizando

exclusivamente AR, aunque teniendo presente que el AR siempre constituirá un punto débil dentro de la mezcla de áridos, pues previsiblemente se degradará y romperá antes que el árido natural.

Por otro lado, como se ha visto en apartados anteriores, el buen comportamiento frente a la fragmentación de la corneana hace que sea muy adecuada para combinarla con el AR y fabricar mezclas bituminosas.

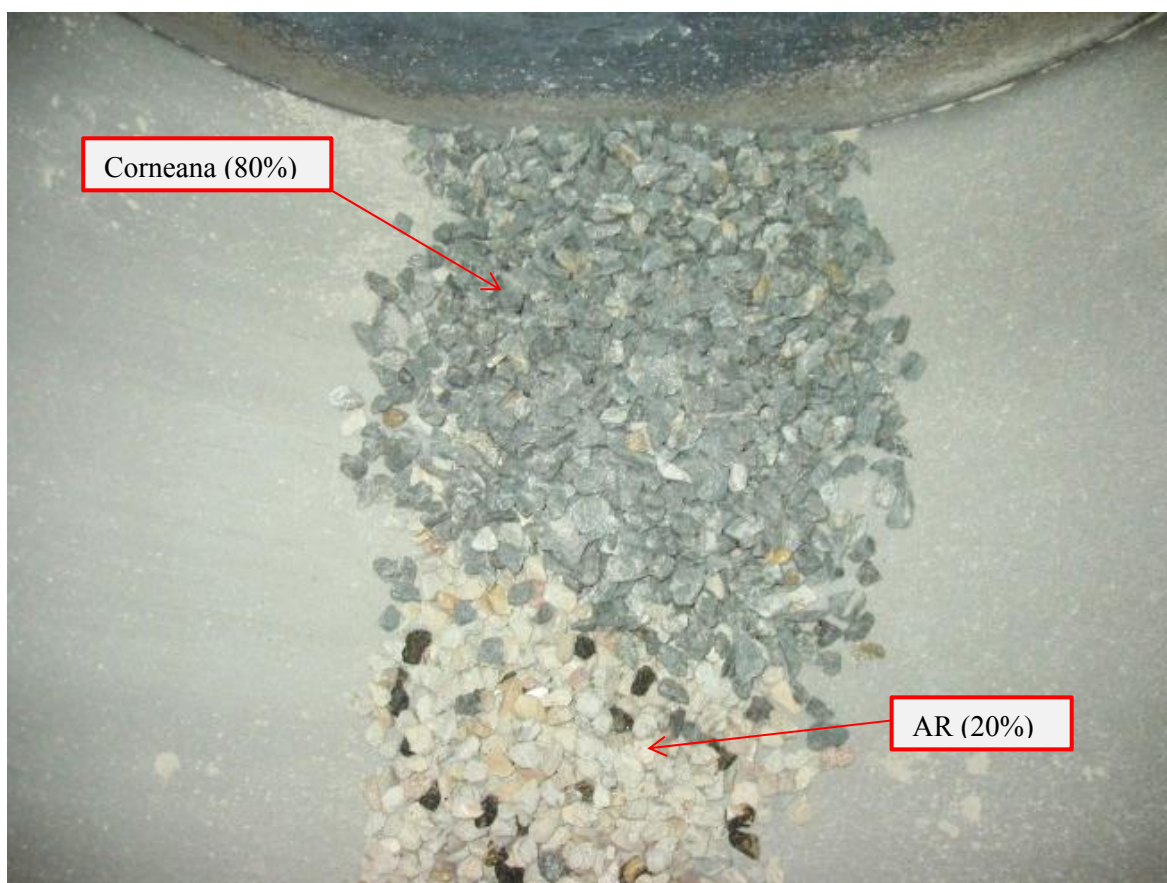


Figura 5.8.- Muestra para la realización del ensayo de Los Ángeles a una combinación de un 80% de corneana y un 20% de AR de tipo hormigón.

Por todo ello se ha llevado a cabo la obtención del LA para diferentes combinaciones de árido natural y AR (figura 5.8). El AR se sustituyó en todas las fracciones empleadas para la realización del ensayo (10/11,2 mm, 11,2/12,5 mm y 12,5/14 mm). Como puede verse en la tabla 5.6 los resultados obtenidos arrojan valores de LA que oscilan entre 15,5% y 19,9%. Todos ellos son inferiores al valor máximo del 25% exigido por el PG-3 para capas de base y categoría de tráfico pesado T00.

% de AR	% de corneana	LA (%)
5	95	15,5
10	90	16,7
20	80	18,6
30	70	19,9

Tabla 5.6.- Coeficiente de Los Ángeles (LA) resultante de la combinación del AR y la corneana.

En la figura 5.9 se han representado los valores del LA frente al porcentaje de AR empleado en la combinación de áridos. También se representan los valores del LA obtenidos anteriormente empleando exclusivamente AR (100% de AR) y empleando exclusivamente corneana (0% de AR).

Evolución del Coeficiente de Los Ángeles con el % de AR

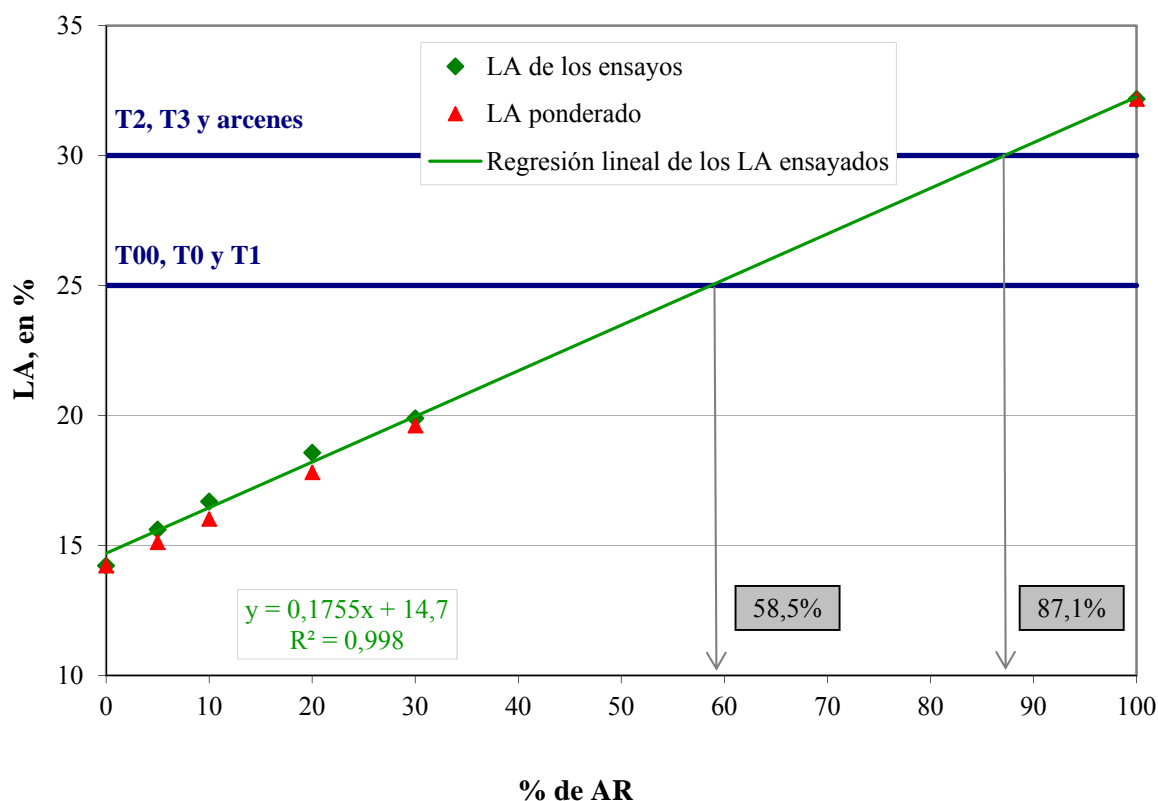


Figura 5.9.- Coeficiente de Los Ángeles frente a porcentaje de AR.

En color verde pueden verse los LA obtenidos en función del porcentaje de AR empleado. Puede apreciarse como una línea de regresión de tipo lineal (“Regresión lineal de los LA ensayados”) se ajusta muy bien a estos valores. Por tanto, a partir del conocimiento de la ecuación lineal se puede estimar el LA para cualquier contenido de AR. Por otro lado,

también haciendo uso de la ecuación es posible estimar de forma precisa los contenidos de AR que según el PG-3 dan lugar a valores de LA aptos para fabricar mezclas bituminosas en caliente para capas de base de tráfico T00, T0 y T1 ($LA < 25$) y T2, T3 y arcenes ($LA < 30$). Introduciendo estos valores límite del LA en la ecuación obtenida resultan los siguientes porcentajes de AR:

- Para tráfico T00, T0 y T1 se podría utilizar hasta un 58,5 % de AR.
- Para tráfico T2, T3 y arcenes se podría utilizar hasta un 87,1 % de AR.
- Para tráfico T4 se podría utilizar el 100% de AR, pues el vigente PG-3 no especifica ningún límite del LA para capas de base con tráfico T4.

Además, también hay otra forma de estimar de forma muy aproximada los valores del LA. Para ello hay que ponderar los valores de los coeficientes de Los Ángeles obtenidos para el 100% de AR y para el 100% de corneana, adoptando como factores de ponderación los porcentajes en los que interviene cada uno de estos dos tipos de árido (ej.: una mezcla con un 20% de AR y un 80% de corneana tendría $LA = (20/100) \times 32 + (80/100) \times 14,2 = 17,8\%$). Los valores así obtenidos para distintos porcentajes de participación del AR se han representado en color rojo en la figura 5.9.

El árido procedente de la corneana es de uso habitual en Galicia y goza de prestigio entre los diferentes fabricantes de mezclas bituminosas. Además se ha comprobado que su LA combinado con el AR es bajo. Por ello, como se ha comentado anteriormente, se ha seleccionado este árido para fabricar mezclas bituminosas en caliente en las que intervengan distintos porcentajes de AR.

5.3.2.3. Densidad de las partículas y absorción de agua del AR

Los resultados obtenidos se pueden ver en la tabla 5.7, que a continuación se adjunta:

Fracción de árido	0,063/4 mm	4/31,5 mm	31,5/40 mm
Método aplicado	Picnómetro	Picnómetro	Balanza hidrostática
ρ_a (g/cm ³)	2,65	2,63	2,63
ρ_{rd} (en g/cm ³)	2,15	2,32	2,29
ρ_{ssd} (g/cm ³)	2,34	2,44	2,42
WA ₂₄ (%)	8,74	5,08	5,6

Tabla 5.7.- Densidades y absorción de agua tras inmersión del AR.

Se observa que los valores de absorción de agua son muy elevados, sobre todo en la fracción más fina (0,063/4 mm), siendo del orden de 10 veces superior a la de un árido convencional. Estas características pueden explicarse por la presencia de mortero adherido, altamente absorbente. Como se mencionó en la revisión bibliográfica realizada en el capítulo 4, otros investigadores han llegado a resultados similares.

El árido fino tiene una mayor superficie específica y es más sensible a fenómenos de adhesividad. Esto, unido a que los valores de absorción son muy elevados hace aconsejable que en el momento de fabricar mezclas bituminosas, la **sustitución de árido natural por AR** se realice **en la fracción gruesa** y no en la fina.

Por otro lado también puede verse que la densidad de los ARs es, en general, menor que la de los áridos convencionales debido a la baja densidad del mortero de cemento adherido. Otros investigadores, como se ha visto en el estado del arte realizado en el capítulo 4, han llegado a las mismas conclusiones.

5.3.3. Propiedades geométricas

5.3.3.1. Forma de las partículas. Índice de lajas del AR

El índice de lajas global de la muestra (I_L) es del 8%; mientras que el mayor índice de lajas se obtiene para la fracción 25/31,5 mm con un valor del 13%. Puesto que el PG-3 indica que para la categoría de tráfico pesado T00 el índice de lajas de las distintas fracciones deberá ser menor o igual que 20%, el AR cumple con las especificaciones del PG-3 para la citada categoría de tráfico pesado, lo cual es acorde con las investigaciones realizadas hasta la fecha al respecto como se ha visto en el capítulo 4.

5.3.3.2. Porcentaje de caras de fractura del árido grueso del AR

Pueden verse en la tabla 5.8 los resultados obtenidos para la fracción 0/40 mm del AR:

Porcentaje de partículas trituradas, Cc:	85,48
Porcentaje de partículas totalmente trituradas, Ctc:	75,90
Porcentaje de partículas redondeadas, Cr:	14,46
Porcentaje de partículas totalmente redondeadas, Ctr:	2,41

Tabla 5.8.- Caras de fractura del AR.

En el PG-3 se indica que para la categoría de tráfico pesado T3 y para arcenes, el porcentaje de partículas trituradas debe ser mayor o igual que el 75% y el de partículas totalmente redondeadas, inferior al 10%. Por tanto en este caso, el AR cumple para T3 y arcenes. Tras la realización del estado del arte cabría esperar un mayor porcentaje de partículas trituradas. Sin embargo, no fue así. Este resultado pone de manifiesto la debilidad del mortero adherido presente en el AR, que tras el proceso de machaqueo no da lugar a aristas vivas, sino a superficies rugosas, pero romas. Por otro lado, la presencia en los hormigones de árido redondeado (que es aconsejable para la trabajabilidad del hormigón) también podría explicar en parte estos resultados.

5.3.3.3. Evaluación de los finos. Equivalente de arena del AR

Se obtuvo un resultado del 67%, que cumple con el valor estipulado por el PG-3 para el equivalente de arena (SE) de los áridos empleados para fabricar mezclas bituminosas en caliente (>50%). Esto confirma los resultados de otros investigadores expuestos en el Capítulo 4.

5.3.3.4. Componentes del AR

La composición de los ARs se determinó de acuerdo con la norma EN 933-11 “Test for geometrical properties of aggregates - Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate” (CEN, 2009).

En la figura 5.10 se muestran los resultados obtenidos. Puede verse que el AR está formado por un 89,3%% en masa de hormigón, mortero, prefabricados de hormigón, áridos con y sin mortero adherido y piedras. Un 6,5% se corresponde con materiales bituminosos; mientras que del 4,2% restante, un 3,6% son productos cerámicos y un 0,6% impurezas, como yeso, madera, cristales, plásticos y goma. En la figura 5.11 puede verse una imagen con algunos de los principales componentes obtenidos durante la realización del ensayo. A la vista de los resultados y de acuerdo con la clasificación descrita en apartado 3.5.3 se trata de un AR procedente de hormigón, aunque presenta una proporción de materiales bituminosos, cerámicos e impurezas superior a los áridos estudiados por Jiménez et al. (2011), en los que se obtenían porcentajes del 96% de áridos con y sin mortero adherido.

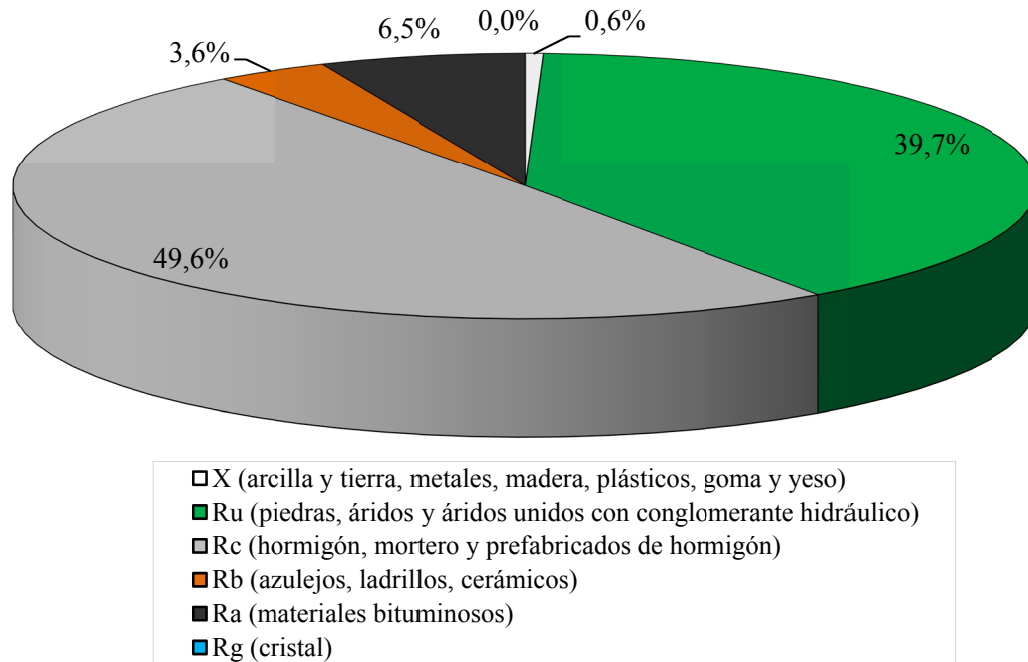


Figura 5.10.- Composición de los ARs.



Figura 5.11.- Detalle de los principales componentes del AR.

Tras identificar los componentes del AR se tomaron muestras representativas de cada uno de ellos y se realizaron sobre ellas ensayos de fluorescencia y difracción de rayos X, cuyos resultados se adjuntan en el siguiente apartado.

5.3.4. Composición química y fases cristalinas

Se ha llevado a cabo la determinación de la composición química por fluorescencia de rayos X y la identificación de fases cristalinas mediante difracción de rayos X de muestras en polvo. Del AR se han analizado tanto muestras de diferentes tamaños como muestras de los diferentes componentes del mismo. En la tabla 5.9 se enumeran y describen las muestras analizadas.

Nombre de la muestra		Descripción
Fracción	02	Fracción 0/2 mm del AR
	811	Fracción 8/11,2 mm del AR
	1014	Fracción 10/14 mm del AR
Componente del AR	HORMN	Prefabricado de hormigón, hormigón, mortero...
	HORMR	Mortero de color rojizo
	HORMB	Mortero de color blanquecino
	YESO	Yeso
	ARCI	Materiales arcillosos...
	LADRI	Materiales tipo ladrillo...
	BITU	Materiales bituminosos
	PIEDR	Áridos, piedras...

Tabla 5.9.- Muestras de AR sobre las que se han realizado ensayos de difracción y fluorescencia de rayos X.

5.3.4.1. Composición química mediante fluorescencia de rayos X

Se adjuntan a continuación dos figuras (5.12 y 5.13) en las que pueden verse los resultados obtenidos agrupados según diferentes criterios. Para facilitar la interpretación de las figuras, se han considerado únicamente los ocho componentes que tienen una mayor presencia dentro de la composición química de las diferentes muestras: SiO₂ (sílice), CaO (óxido cálcico), CO₂ (dióxido de carbono), Al₂O₃ (alúmina), K₂O (óxido de potasio), MgO (magnesia), Fe₂O₃ (óxido férrico) y SO₃ (trióxido de azufre). El resto de los componentes se encuentran en proporciones inferiores al 1%.

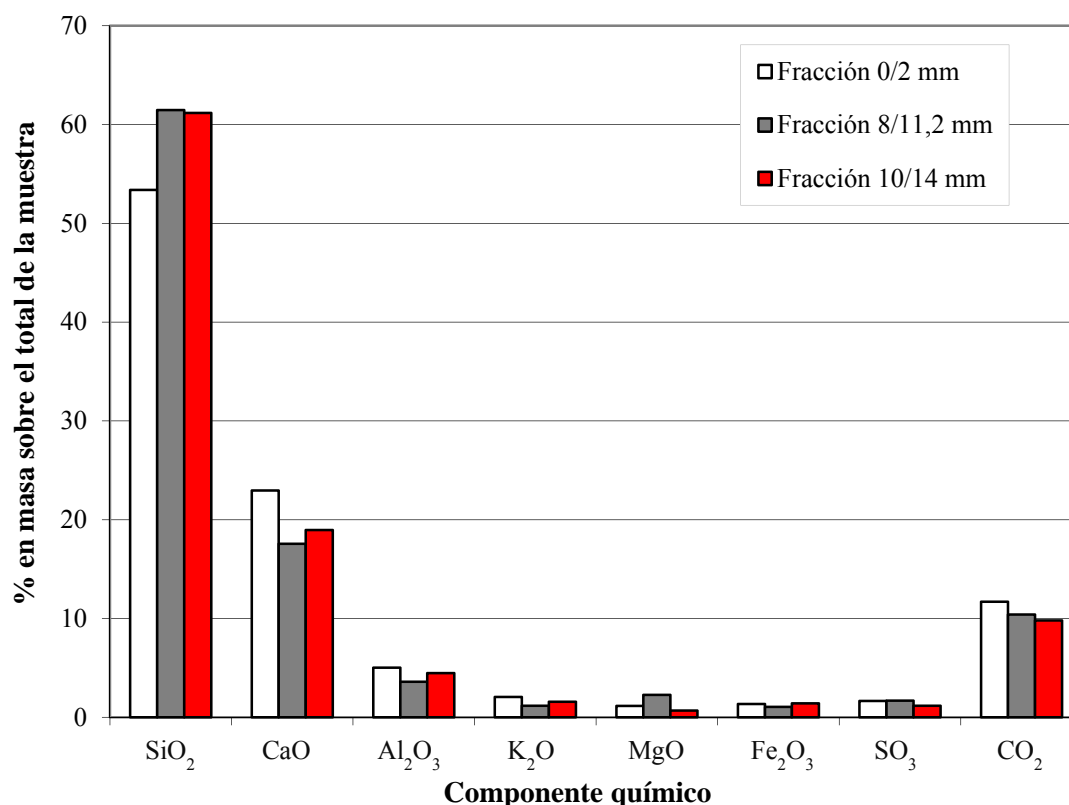


Figura 5.12.- Composición química de los ARs según la fracción considerada.

En la figura 5.12 se puede ver la composición química del AR por tamaños, según las diferentes fracciones analizadas: la 0/2 mm, la 8/11,2 mm y la 10/14 mm. Se puede concluir que la composición química es muy similar en la totalidad de las fracciones consideradas, aunque es conveniente realizar una serie de matizaciones:

- El principal componente en todos los tamaños analizados es el sílice (SiO₂), que está presente en más del 50% en peso en las tres fracciones analizadas. En el tamaño 0/2 mm, tiene una menor presencia que en las fracciones de mayor tamaño (8/11,2 mm y 10/14 mm), en las que incluso supera el 60%.
- El segundo componente es el óxido de calcio (CaO), con porcentajes próximos al 20%, de tal forma que en la fracción 0/2 mm supera ligeramente este porcentaje, mientras que en las otras dos fracciones no llega a alcanzarlo.
- En todos los casos el tercer componente es el dióxido de carbono (CO₂) y el cuarto el óxido de aluminio (Al₂O₃).

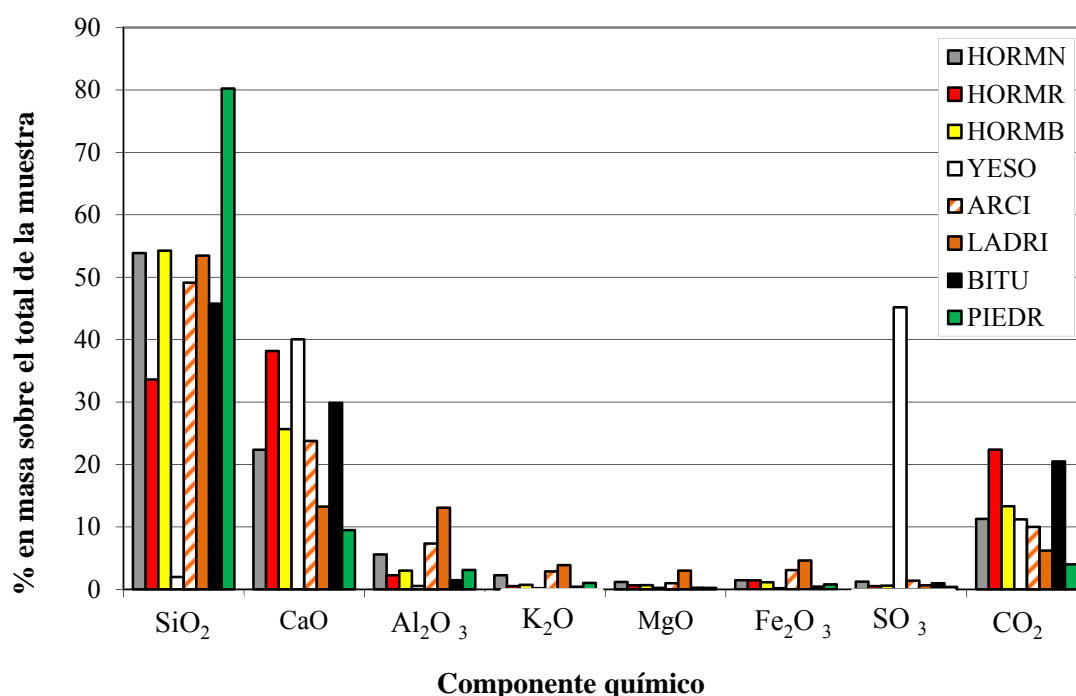


Figura 5.13.- Composición química de los ARs según el constituyente considerado.

En la figura 5.13 se puede ver la composición química de los distintos constituyentes del árido reciclado. En la citada figura puede observarse que:

- Salvo las muestras “YESO” (yeso) y “HORMR” (mortero de color rojizo), en las que predomina el trióxido de azufre (SO₃) y el óxido de calcio (CaO) respectivamente, el resto de los componentes son principalmente de naturaleza silíceo.
- En el caso de “HORMR” el segundo componente principal es el sílice, mientras que en el caso de “YESO” es el óxido de calcio.
- Destaca la muestra “PIEDR” (áridos, piedras, etc) por tener una proporción de sílice superior al 80%.

Por tanto, a la vista de los resultados se puede concluir que:

- Con excepción de las partículas de yeso, el AR es de naturaleza predominantemente silíceo, con lo que se espera que su adhesividad con el ligante no sea buena.
- Por otro lado, se espera que los componentes de naturaleza silíceo tengan una mayor resistencia a la fragmentación que los de naturaleza caliza.

- Dado que el **yeso** tendrá una mala resistencia a la fragmentación sería conveniente **eliminarlo del AR** en el momento de fabricar mezclas bituminosas.

5.3.4.2. Fases cristalinas mediante difracción de rayos X

Las fases cristalinas de las muestras analizadas se indican en la tabla 5.10.

		Fases cristalinas										
		Cuarzo	Feldespato potásico	Feldespato de tipo plagioclasa	Calcita	Dolomita	Micas	Gismondina	Silicato de magnesio	Bassanita	Yeso	Ankerita
Muestras	02	X	X	X	X	X	X					
	811	X	X	X	X	X	X					X
	1014	X	X		X		X	X				
	HORMN	X	X		X	X	X					
	HORMR	X	X		X							
	HORMB	X	X	X	X		X		X			
	PIEDR	X	X	X	X							
	BITU	X	X	X	X							
	YESO	X			X					X	X	
	ARCI	X	X	X	X	X	X	X				
	LADRI	X	X	X	X			X				

Tabla 5.10.- Fases cristalinas de diferentes muestras de AR y sus constituyentes.

La composición mineralógica de los áridos está relacionada con su comportamiento, por lo que a la vista de la tabla 5.10 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El “Cuarzo”, presente en todas las muestras analizadas, suele presentar una pobre adherencia con el ligante (Bagampadde, 2004) por lo que se espera que la envuelta de los ARs con el ligante sea dificultosa.
- La “Calcita”, también presente en todas las muestras analizadas, presenta una buena adherencia, pero suele ser friable (Bagampadde, 2004), con lo cual aporta al AR una baja resistencia a la fragmentación.

- El “Feldespatos potásico” aparece en todas las muestras excepto en la denominada “YESO”. Este mineral favorece el fallo por desenvuelta o *stripping* (Bagampadde, 2004), por lo cual es de esperar que el AR no tenga una buena sensibilidad al agua.
- Cabe señalar que se aprecian diferentes fases cristalinas en función del tamaño de la fracción a analizar. Así la fracción 0/2 y 8/11 se diferencian en que en la 8/11 aparece “Ankerita”. La 10/14 se diferencia de las dos anteriores en que aparece la “Gismondina” y no se aprecia ni la “Dolomita”, ni la “Ankerita”, ni tampoco los “Feldespatos de tipo plagioclase”. La “Dolomita” es friable y presenta una buena adherencia; mientras que la “Gismondina” es propensa a sufrir falta de adhesividad con el ligante (Bagampadde, 2004). Los “Feldespatos de tipo plagioclase” mejoran o empeoran la adhesividad de la mezcla bituminosa en función de si permiten la formación de sales de Ca insolubles o sales de Na y K solubles respectivamente (Bagampadde, 2004). Por ello, es previsible que existan diferencias de comportamiento de adhesividad y sensibilidad al agua en función de la fracción de AR que se utilice en la posterior fabricación de mezclas bituminosas.
- Si se analizan las fases cristalinas de los ocho distintos componentes puede verse que existen diferencias entre unos y otros, siendo el más dispar el caso del “YESO”. Por tanto, dentro del propio AR habrá diferencias en el comportamiento de sus diferentes componentes. Por tanto, se espera una cierta dispersión en los resultados, en función de que en el material a utilizar en la fabricación de cada una de las probetas se encuentra una mayor cantidad de uno u otro componente.

5.3.5. Composición química y fases cristalinas tras realizar el ensayo de Los Ángeles al AR

Puesto que, como se ha visto, el AR está formado por diferentes componentes, resulta conveniente determinar cuáles presentan una menor resistencia a la fragmentación. Así, podrían eliminarse antes de proceder a la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Para ello, a las fracciones empleadas antes y después de la realización del ensayo de Los Ángeles se les aplicó difracción y fluorescencia de rayos X. De esta forma se puede ver la variación en la composición antes y después de la realización del ensayo. En la tabla 5.11 pueden verse las muestras que se han analizado.

Nombre de la muestra	Descripción
1014	AR utilizado para el ensayo de Los Ángeles. Fracción 10/14 mm del AR, lavado y secado, justo antes de hacer el ensayo de Los Ángeles.
PASA	Árido que pasa por el tamiz 1,6 mm tras someter el AR al ensayo de Los Ángeles.
RETE	Árido retenido por el tamiz 1,6 mm tras someter el AR al ensayo de Los Ángeles. Lavado y secado.

Tabla 5.11.- Muestras analizadas por fluorescencia y difracción de rayos X antes y después de la realización del ensayo de Los Ángeles.

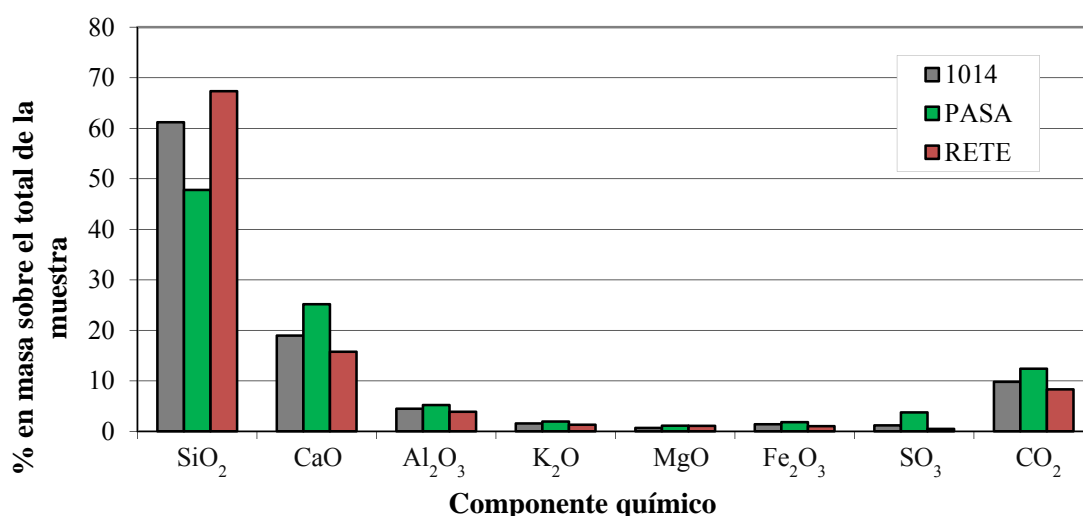


Figura 5.14.- Composición química del AR utilizado en la realización del ensayo de Los Ángeles.

La figura 5.14 muestra los principales 8 componentes químicos de las muestras analizadas. En el citado gráfico puede verse que:

- Al comparar las tres fracciones puede verse que el porcentaje de sílice (SiO₂) es superior en la fracción retenida por el tamiz de 1,6 mm e inferior en la que pasa por el 1,6 mm, con respecto al porcentaje de la fracción 10/14 mm (antes de realizar el ensayo). En cambio, el porcentaje de óxido de calcio (CaO) sufre la tendencia inversa, es superior en la fracción que pasa por el tamiz 1,6 mm e inferior en el retenido por el 1,6 mm. Por tanto, tal y como se esperaba, los componentes de tipo silíceo son más resistentes a la fragmentación que los de tipo calizo.
- En el caso del SO₃, componente fundamental del yeso, la mayor parte de la muestra pasa por el tamiz 1,6 mm, por lo que se puede concluir que el yeso ha sido fragmentado durante la realización del ensayo de Los Ángeles, confirmando así la

poca resistencia a la fragmentación esperada del mismo y, por tanto, la conveniencia de eliminarlo del AR cando se vaya a utilizar para fabricar mezclas bituminosas en caliente.

Las fases cristalinas encontradas pueden verse en la tabla 5.12. Pueden apreciarse pequeñas diferencias: en la fracción 10/14 aparece la “Gismondina” y no se presenta ni la “Dolomita” ni los “Feldespatos de tipo plagioclasa”. En las otras dos muestras ensayadas (la que pasa y la retenida) aparecen fases cristalinas similares. Por tanto, se aprecian pequeñas diferencias en las fases cristalinas antes y después de realizar el ensayo de Los Ángeles, pero no en las dos fracciones resultantes del ensayo, la que pasa y la retenida. Puesto que la “Gismondina” es friable (Bagampadde, 2004) era de esperar que tras la realización del ensayo de Los Ángeles no quedase rastro de su presencia. Por ello, tras someter al AR al ensayo de Los Ángeles, el material resultante debería tener una mayor resistencia a la fragmentación. La aparición de “Feldespatos de tipo plagioclasa” y “Dolomita” en las fracciones resultantes de la realización del ensayo de Los Ángeles puede atribuirse a la heterogenidad característica del AR.

		Fases cristalinas										
		Cuarzo	Feldespato potásico	Feldespatos de tipo plagioclasa	Calcita	Dolomita	Micas	Gismondina	Silicato de magnesio	Bassanita	Yeso	Ankerita
Muestras	1014	X	X		X		X	X				
	PASA	X	X	X	X	X	X					
	RETE	X	X	X	X	X	X					

Tabla 5.12.- Fases cristalinas del AR utilizado en la realización del ensayo de Los Ángeles.

5.3.6. Consideraciones finales sobre la caracterización del AR

Los ARs procedentes de la planta de gestión y reciclado de RCD de la empresa TEC REC, suministrados en la fracción 0/40 mm presentan una serie de características particulares que van a condicionar su utilización a la hora de fabricar con ellos mezclas bituminosas en caliente. Todas estas particularidades, que se han ido viendo a lo largo del presente capítulo, se sintetizan a continuación:

- Presentan una granulometría continua, lo que permitirá obtener cualquiera de las fracciones que se necesiten para fabricar las mezclas bituminosas.
- Están formados por un 95,8% en masa de hormigón, productos de hormigón, mortero, áridos y materiales bituminosos. El restante 4,2% está formado por yeso, azulejos, ladrillos, materiales cerámicos y otras impurezas de menor presencia como cristal y flotantes. Estos materiales de menor resistencia y previsible mala adhesividad deberían ser retirados.
- El AR fino es más sensible a fenómenos de adhesividad por su mayor superficie específica. Así mismo los valores de absorción del AR son muy elevados, en particular en la fracción más fina (0,063/4 mm), en la que llegan a ser del orden de unas 10 veces superiores a los de un árido convencional (tablas 5.2 y 5.3). Todo esto unido a que resulta más difícil retirar impurezas de forma visual y manual en la fracción más fina, obliga a que para fabricar mezclas bituminosas, la sustitución de árido natural por AR se realice en la fracción gruesa y no en la fina. Esta conclusión se ve reforzada por el hecho de que cuanto menor es el tamaño de AR, mayor es el contenido de mortero presente en el mismo, lo cual afecta negativamente a las propiedades del AR (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009). Por ello se ha optado por realizar la sustitución en la fracción 8/16 y en la 4/8. La sustitución en fracciones más gruesas podría introducir grandes dispersiones en los resultados debidas a la heterogeneidad del material.
- Los ARs presentan un coeficiente de LA elevado, del 32%. Así, sin combinar con ningún tipo de árido natural, este valor los hace aptos solamente para fabricar mezclas bituminosas en caliente para la categoría de tráfico pesado más baja, es decir, la T4. Por tanto, a la hora de seleccionar un árido natural para combinar con el AR será preciso escoger un árido natural que presente un LA lo suficientemente bajo como para que el LA combinado (de la mezcla de AR y árido natural) sea tal que permita fabricar mezclas de categorías de tráfico pesado superiores. En este sentido, la corneana parece ser el más idóneo, por lo que se ha seleccionado para la posterior fabricación de mezclas bituminosas en caliente en las que intervenga AR. No obstante, hay que tener presente que el AR siempre constituirá la parte más débil en cuanto a resistencia a la fragmentación. Por ello, a pesar del excelente

valor numérico del LA combinado (AR y natural) podría no ser adecuado fabricar mezclas con AR para categorías de tráfico demasiado elevadas.

- El porcentaje de caras de fractura del AR también hace que las mezclas fabricadas con este tipo de áridos no sean aptas para las más altas categorías de tráfico pesado.
- El AR es de naturaleza predominantemente silícea, por lo que se espera que su adhesividad con el ligante no sea buena. Además, presenta “Cuarzo”, que también se asocia con una pobre adherencia con el ligante (Bagampadde, 2004).

5.4. CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE

Se han utilizado tres tipos de betún, con penetraciones diferentes B35/50, B50/70 y B160/220, todos ellos de utilización habitual en España.

Sus principales características se solicitaron a la empresa suministradora de betunes y son las que se indican en la tabla 5.13.

Características	Unidad	Norma	B35/50	B50/70	B160/220
Betún original					
Penetración a 25°	0,1 mm	NLT 124	47	60	183
Índice de penetración	-	NLT 181	-0,71	-0,5	-0,2
Punto de reblandecimiento anillo y bola	°C	NLT 125	52,5	50,8	40,4
Punto de fragilidad Fraass	°C	NLT 182	-6	-7	-4
Ductilidad (5 cm/min.)	a 15 °C	cm	NLT 126	-	-
	a 25 °C			-	-
Solubilidad en tolueno	%	NLT 130	>99,9	99,9	99,8
Contenido en agua (en volumen)	%	NLT 123	0	-	-
Punto de inflamación	°C	NLT 127	298	>290	>290
Densidad relativa (25 °C)	-	NLT 122	1,0392		
Viscosidad cinemática a 135°C	mm ² /s	UNE-EN 12595	-	430	218
Residuo después de película fina					
Variación de masa	%	NLT 185	-0,06	-0,04	-0,23
Penetración Conservada	%	NLT 124	83	68	57
Δ punto de reblandecimiento anillo y bola	°C	NLT 125	5	6,5	9,3

Tabla 5.13.- Características del betún.

Además, sobre los citados ligantes se han realizado ensayos en la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la UDC de penetración a 25°C, de densidad y de punto de

reblandecimiento anillo y bola, según las norma NLT-124/84, NLT-122/84 y NLT-125/84 (MOPT, 1992). Los resultados obtenidos se indican en la tabla 5.14.

Betún	Penetración (dmm)	Reblandecimiento anillo y bola (°C)	Densidad relativa
B35/50	38	59,5	1,023
B50/70	52	54,9	1,009
B160/220	212	39,5	0,998

Tabla 5.14.- Resultados de los ensayos de penetración, densidad y reblandecimiento anillo y bola.

5.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS POLVOS MINERALES Y LA ECL-2D

5.5.1. Cal hidratada

La cal hidratada, aérea o apagada (hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) de tipo CL-90 S es un producto comercial que se presenta en forma de polvo blanco, con una densidad a granel inferior a 600 kg/m^3 . Presenta un 2% en masa retenido sobre el tamiz de 0,2 mm como máximo y un contenido mínimo de $\text{CaO}+\text{MgO}$ del 90%. Se utiliza en la presente tesis como polvo mineral y como pretratamiento del árido, este último en forma de lechada. Para su utilización se procedió en primer lugar al tamizado de la misma con el tamiz 0,080 mm con el fin de disgregarla y facilitar el mezclado de la misma

5.5.2. Cemento

Se ha utilizado cemento portland compuesto CEM II/B-M (V-L) 32,5 N como polvo mineral. Según datos facilitados por el fabricante, este cemento tiene las propiedades que se adjuntan en la tabla 5.15.

Composición (%)	Clinker de cemento Portland (K)	71,0
	Cenizas volantes silíceas (V)	19,9
	Caliza (L)	9,1
Superficie Blaine (g/cm^2)	3.134	
ρ_{rd} (g/cm^3)	3,10	

Tabla 5.15.- Principales características del cemento CEM II/B-M (V-L) 32,5 N utilizado como polvo mineral.

5.5.3. Cenizas volantes

Las cenizas volantes se han utilizado como polvo mineral en la fabricación de las mezclas bituminosas. Las cenizas volantes proceden de una central térmica de la Comunidad Autónoma de Galicia. En esta central se utiliza como combustible principal un lignito pardo local y, en menores proporciones, como combustibles de apoyo, se utilizan carbones de diseño de hulla bituminosos y subbituminosos. En función del combustible utilizado la composición de las cenizas varía dentro de los límites que se indican en la tabla 5.16. Como puede verse presentan entre un 33,1% y un 63,5% de SiO_2 , por lo que previsiblemente no tengan un efecto favorable sobre la adhesividad. Sin embargo, se ha optado por utilizarlas con el fin de contrastar los resultados.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	TiO_2	SO_3
Máximo	63,5	32,7	15	11,5	4,0	1,0	1,0	2,5	2,1	8,0
Mínimo	33,1	16,6	2,7	1,85	0,5	0,06	0,27	0,1	0,44	1,0

Tabla 5.16.- Composición de las cenizas volantes.

5.5.4. Polvo mineral calizo comercial

Como polvo mineral de aportación además de utilizar cal hidratada, cemento y cenizas volantes, se ha utilizado un polvo mineral calizo comercial. Se trata de un carbonato cálcico natural, fabricado a partir de una calcita marmórea de gran pureza química y blancura, cuyas principales características, facilitadas por el suministrador, se presentan en la tabla 5.17. En este caso, el bajo contenido de sílice ($<0,08\%$) y el elevado contenido de óxido de calcio ($>63,77\%$), son indicativos de que este polvo mineral debería mejorar la adhesividad de la mezcla.

5.5.5. Emulsión ECL-2d

Se ha utilizado una emulsión catiónica de rotura lenta, ECL-2d, con un contenido de betún del 61,2%, como pretratamiento del AR. En la tabla 5.17 se resumen sus principales características.

Composición química	Óxido de calcio (CaO)	> 63,77 %
	Magnesia (MgO)	< 0,47%
	Sílice (SiO ₂)	< 0,08 %
	Alúmina (Al ₂ O ₃)	< 0,09 %
	Óxido Férrico (Fe ₂ O ₃)	< 0,04 %
Riqueza en Carbonato Cálcico (CaCO ₃)		> 97,1 %
Peso específico (g/cm ³)		2,67
pH		9,4
Humedad (%)		0,05
Absorción en aceite		15,9 g / 100 g
Densidad aparente en tolueno (g/cm ³)		0,67
Estudio granulométrico	90,0% partículas	< 63 μm
	80,5% partículas	< 45 μm

Tabla 5.17.- Propiedades del polvo mineral calizo comercial.

Características	Unidad	Norma	Resultados
Emulsión original			
Propiedades perceptibles	-	UNE-EN 1425	Apto
Polaridad de las partículas	-	UNE-EN 1430	Positiva
Índice de rotura	g	UNE-EN 13075-1	120-180
Contenido de ligante (por contenido de agua)	%	UNE-EN 1428	52-62
Contenido de aceite destilado	%	UNE-EN 1431	≤ 2,0
Tiempo de fluencia (2 mm, 40°C)	s	UNE-EN 12846-1	15,45
Penetración a 25°	0,1 mm	UNE-EN 1426	183
Residuo de tamizado (por tamiz 0,5 mm)	%	UNE-EN 1429	≤ 0,1
Tendencia a la sedimentación (7 días)	%	UNE-EN 12847	≤ 10
Adhesividad	%	UNE-EN 13614	≥ 90
Residuo por evaporación (UNE-EN 13074)			
Penetración a 25°	0,1 mm	UNE-EN 1426	≤ 100
Punto de reblandecimiento anillo y bola	°C	UNE-EN 1427	≥ 43
Residuo por evaporación (UNE-EN 13074-1) seguido de estabilización (UNE-EN 13074-2) y de envejecimiento (UNE-EN 14769)			
Penetración a 25°	0,1 mm	UNE-EN 1426	≤ 100
Punto de reblandecimiento anillo y bola	°C	UNE-EN 1427	≥ 43

Tabla 5.18.- Propiedades de la emulsión ECL-2d.

Capítulo 6
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA AFINIDAD ÁRIDO -
LIGANTE

6.1. INTRODUCCIÓN

Como es sabido, la adhesividad es la capacidad de un ligante para permanecer fijado a un árido recubriéndolo sin ningún riesgo de desplazamiento aun en presencia de agua o tráfico. La adhesividad puede ser activa (capacidad de un ligante para mojar el árido durante su mezcla) o pasiva (resistencia del betún a ser desplazado de la superficie del árido por el agua o el tráfico). Puede decirse que la humedad es el principal responsable de los problemas de adhesividad, pero la presencia de bacterias puede ocasionar procesos metabólicos microbianos en la interfaz árido-ligante, que den lugar a la formación de subproductos que debiliten la adhesión en la interfaz (Bagampadde et al., 2004).

Los factores que intervienen en la adhesividad entre el árido y el ligante se pueden agrupar de la siguiente forma (Bagampadde et al., 2004): propiedades del ligante hidrocarbonado, propiedades de los áridos, propiedades del agua, efectos del tráfico y otros factores. En este orden de ideas cabe destacar que:

- La utilización de betunes de alta viscosidad produce mezclas bituminosas con mayores resistencias al fenómeno de desenvuelta (Abo-Qudais y Al-Shweily, 2007). Sin embargo, durante las operaciones de mezclado, es preferible tener bajas viscosidades, ya que altas viscosidades están asociadas con un mojado más pobre de los áridos por el betún (Bagampadde et al., 2004).
- La composición mineralógica y química de los áridos afecta a su afinidad con el agua y el betún. Generalmente, los áridos de tipo silíceo (ácidos) se consideran hidrofílicos y, por tanto, con mala afinidad con el ligante. En cambio, los calizos (básicos) son hidrofóbicos y, por tanto, con buena afinidad con el ligante (Hicks, 1991). Así, los áridos calizos presentan iones libres de calcio que forman enlaces resistentes al agua con el betún, mientras que los áridos silíceos forman enlaces débiles con el betún (Bagampadde et al., 2004).
- Las rugosidades existentes en la superficie de un árido permiten que el ligante se entrelace mecánicamente con él de forma más fuerte que si no hubiera rugosidades. Así, cuanto más rugosa sea la superficie de un árido, existirá una mejor adhesión con el ligante (Bagampadde et al., 2004). Por otro lado, los áridos angulosos pueden favorecer el fenómeno de desenvuelta, como consecuencia de las rupturas

de la película de ligante que pueden darse en las aristas (Abo-Qudais y Al-Shweily, 2007). Además, los poros permiten el transporte del agua a través de la mezcla bituminosa, propiciando el daño por agua. Por ello, la influencia de la porosidad en la sensibilidad al agua de la mezcla bituminosa depende de una combinación de varios aspectos. Así, el porcentaje de huecos en la mezcla, su tamaño, distribución, conectividad y tortuosidad (que dependen fundamentalmente de las propiedades de los áridos y del proceso de diseño y compactación de la mezcla bituminosa) influyen en el transporte de agua en las mezclas bituminosas (Caro et al., 2008).

Como se ha visto en la revisión bibliográfica realizada en el capítulo 4, una gran parte de los investigadores coinciden en que uno de los principales problemas que se deben solucionar de cara a la fabricación de mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados (ARs) de tipo hormigón procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) es su mala adhesividad (Paranavithana et al., 2006; Mills-Beale y You, 2010; Pérez et al., 2007, 2010, 2012a y 2012b). Por ello, es fundamental buscar soluciones para este problema.

En este sentido, con el fin de mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas, se pueden adoptar numerosas medidas (Abo-Qudais y Mulqui, 2005):

- Tratar la mezcla con agentes activantes. Varias investigaciones indican que la lechada de cal hidratada es el agente activante más efectivo que existe, cuando se preenvuelve con ella el árido, con anterioridad a las operaciones de calentamiento y mezclado (Abo-Qudais y Mulqui, 2005). Cabe señalar que la mayor parte de agentes activantes químicos son perjudiciales para el medio ambiente, por lo que su empleo se ha descartado en la presente tesis, ya que el fin último de la utilización de AR es colaborar con el desarrollo sostenible.
- Añadir polvos minerales naturales o comerciales seleccionados. En Estados Unidos el cemento Portland es uno de los aditivos que se utiliza para mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas. Además, el cemento Portland mejora otras propiedades de las mezclas (Abo-Qudais y Mulqi, 2005). También la cal hidratada puede utilizarse sustituyendo un determinado porcentaje del polvo mineral que va a emplearse en la fabricación de la mezcla bituminosa. Hay investigadores que indican que la cal ha demostrado ser mucho más efectiva que el

cemento (Little y Epps, 2001). Así mismo, hay otros polvos minerales habitualmente utilizados como las cenizas volantes o los calizos.

- Realizar la envuelta del árido con betún u otros ligantes hidrocarbonados de forma previa a la fabricación de la mezcla bituminosa.
- Evitar la utilización de áridos hidrofílicos.
- Secar el árido con anterioridad a la mezcla con el ligante.
- En obra, garantizar el adecuado drenaje superficial y subterráneo.
- Realizar una exposición previa del árido a las inclemencias meteorológicas con el fin de reducir los cambios perjudiciales en la superficie del árido.

Por todo ello, se hizo necesario abordar en primer lugar un estudio de la afinidad entre el árido y el ligante, probando diferentes remedios, de entre los anteriormente indicados, que permitiesen mejorar la adhesividad. Este estudio se ha llevado a cabo mediante dos tipos de ensayos, con el fin de poder contrastar y completar los resultados obtenidos y, en la medida de lo posible, generalizar las conclusiones.

6.2. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

Como se dicho, se han llevado a cabo dos tipos de ensayo. Ambos se utilizan para determinar la adhesividad pasiva y se aplican sobre la muestra suelta. Este tipo de ensayos son más sencillos y menos costosos de realizar que los que se llevan a cabo sobre muestras compactadas; en cambio, son subjetivos y cualitativos y no tienen en cuenta variables tales como la presión en los poros, el tráfico y las propiedades de la mezcla (Solaimanian et al., 2003). Puesto que se llevan a cabo sobre probetas de muestra sin compactar, solo reflejan la pérdida de adhesividad (pasiva, como se ha indicado) y no la de cohesión. En concreto se han llevado a cabo ensayos basados en la estimación de la desenvuelta. Este tipo de ensayos consisten en apreciar, de forma generalmente visual, la desenvuelta producida por el agua en áridos previamente envueltos con ligante.

Los ensayos pertenecientes a este grupo se diferencian fundamentalmente entre sí en: el procedimiento empleado para acelerar o poner de manifiesto el efecto de desenvuelta del ligante por el agua; la temperatura del agua; el tiempo de inmersión; el empleo o no de agitación; la posible adición al agua de agentes químicos; etc. (Miró Recasens, 1994).

El primero de los ensayos empleados viene descrito en la norma ASTM “D 3625 - 96 Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water” (ASTM, 2005). Esta norma describe un procedimiento de fácil realización, eficaz y bastante rápido para la determinación de la susceptibilidad al agua de los áridos recubiertos de betún. Una muestra de unos 250 g de mezcla bituminosa suelta se deja enfriar a una temperatura de entre 85°C y la temperatura de ebullición del agua (figura 6.1). Alcanzada la temperatura objetivo, la muestra se introduce en un recipiente con agua destilada hirviendo durante 10 minutos (figura 6.2). Transcurrido ese tiempo se retiran los restos de betún que se hayan desprendido y la muestra se deja enfriar hasta temperatura ambiente. A continuación, tras retirar el agua, se deposita la muestra en una toalla blanca de papel (figura 6.3) y se realizan observaciones, inmediatamente y a las 24 horas, del grado de recubrimiento del árido por el ligante. En este ensayo los requerimientos mínimos de recubrimiento para considerar que un árido y un ligante presentan una buena adhesividad son de un 85-90% (Kiggundu y Roberts, 1988).

El segundo de los ensayos realizados en la presente tesis se rige por la norma UNE-EN 12697-11 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 11: Determinación de la afinidad entre áridos y betún” (AENOR, 2007d). Esta norma permite la utilización de tres procedimientos denominados A (método de la botella giratoria), B (método estático) y C (método de fraccionamiento del ligante en agua caliente). De todos ellos se ha escogido el procedimiento A, el método de la botella giratoria. Aunque es subjetivo, pues depende de la apreciación visual del operario, es útil y sencillo de realizar. Tal y como se indica en la citada norma UNE, el procedimiento B es menos preciso y el procedimiento C exige una mayor habilidad de los operarios para obtener resultados fiables.

En el método de la botella giratoria se introduce la mezcla bituminosa suelta a temperatura ambiente en una botella con agua destilada a 5°C (figura 6.4) y se hace girar con una velocidad normalizada unos determinados intervalos de tiempo (figura 6.5), transcurridos los cuales se introducen las muestras en cristalizadores con agua destilada limpia (figura 6.6) y se observa el grado de revestimiento del árido por el ligante. Las observaciones se realizan a las 6 horas y a las 24 horas de giro (opcionalmente puede prolongarse el ensayo y realizarse observaciones a las 48 horas y a las 72 horas de giro). No se han encontrado

requerimientos mínimos de recubrimiento para el ensayo de la botella giratoria, así que los resultados de este ensayo se han utilizado para comparar las distintas muestras entre sí.

En los próximos apartados se explicará la investigación de la afinidad realizada con estos dos tipos de ensayo. En este sentido se han realizado los siguientes análisis de afinidad:

- En el apartado 6.3 se incluye la investigación sobre la influencia del grado de penetración del ligante. Para ello se utilizaron ligantes de diferentes penetraciones y se realizaron ensayos con áridos procedentes de cantera y de RCD.
- En el apartado 6.4 puede verse la investigación de la influencia del polvo mineral. Para ello se estudiaron cinco tipos diferentes de polvo mineral.
- En el apartado 6.5 se incluye la investigación sobre la influencia de aplicar pretratamientos al AR, para lo cual se analizaron tres tipos diferentes de pretratamiento.



Figura 6.1.- “Boiling Water Test”. Enfriamiento de la mezcla bituminosa suelta antes de su introducción en agua hirviendo.



Figura 6.2.- “Boiling Water Test”. Una vez alcanzada la temperatura deseada, la mezcla bituminosa suelta se introduce en agua hirviendo durante 10 minutos.



Figura 6.3.- “Boiling Water Test”. Muestras dispuestas en la toalla blanca de papel para su observación.



Figura 6.4.- Ensayo de la botella giratoria. Introducción de la mezcla bituminosa suelta en las botellas con agua destilada a 5°C.



Figura 6.5.- Ensayo de la botella giratoria. Detalle de las botellas con agua destilada y muestra de mezcla bituminosa suelta colocadas en el dispositivo para giro de las botellas.

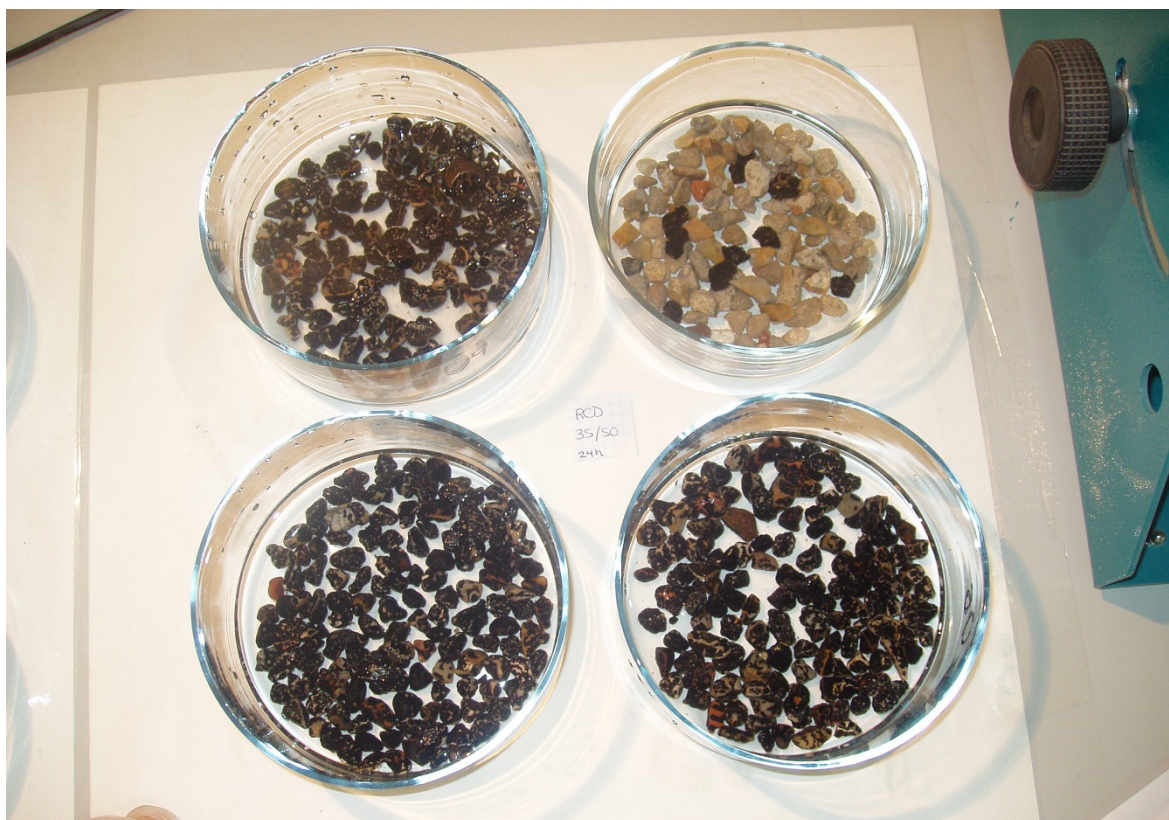


Figura 6.6.- Ensayo de la botella giratoria. Observación de las muestras en agua destilada tras el giro.

6.3. INFLUENCIA DEL GRADO DE PENETRACIÓN DEL LIGANTE EN LA AFINIDAD ÁRIDO - LIGANTE

6.3.1. Fabricación de las mezclas sueltas

Para analizar la influencia del grado de penetración del betún en la afinidad entre el árido y el ligante se han ensayado tres tipos de betún: B35/50, B50/70 y B160/220. Como se ha mencionado anteriormente, los tres betunes se han ensayado con cinco tipos diferentes de áridos: los cuatro áridos naturales disponibles (corneana, gabro, calcita dolomítica y esquisto feldespático) y el AR procedente de RCD. Las principales características tanto de los áridos como de los betunes pueden consultarse en el capítulo 5. Con las quince mezclas sueltas así obtenidas se ha realizado tanto el “Boiling Water Test” como el ensayo de la botella giratoria. En todos los casos las mezclas sueltas se han fabricado con un 3% de ligante s/mezcla, proporción que se mantendrá tanto en el estudio de la influencia del tipo de polvo mineral (apartado 6.4) como en el análisis del pretratamiento (apartado 6.5).

Aunque en la fabricación de las mezclas bituminosas estudiadas a lo largo de la tesis se ha utilizado un B50/70 por ser de utilización habitual y por su mayor disponibilidad, se consideró interesante abordar este estudio para profundizar en el conocimiento de la influencia de la penetración en la afinidad. Además este estudio permitió obtener conclusiones acerca de la mayor o menor idoneidad del ligante utilizado.

A efectos de poder comparar los resultados de los dos ensayos, se han fabricado las mezclas bituminosas sueltas siguiendo el procedimiento indicado en la norma UNE-EN 12697-11 que describe el método de la botella giratoria, pues la norma ASTM D 3625-96 en la que se describe el ensayo del “Boiling Water Test” no indica un procedimiento de fabricación específico.

Así, por un lado, se ha utilizado la fracción de áridos 8/11,2 mm, tanto en el presente análisis como en el del tipo de polvo mineral (apartado 6.4) y en el del pretratamiento (apartado 6.5). Las razones para escoger este tamaño frente a las otras dos fracciones permitidas por la norma UNE-EN 12697-11 (la 5/8 mm y la 6/10 mm) son las siguientes:

- La fracción más pequeña permitida, la 5/8 mm, tiene un mayor riesgo de aglomerarse durante el procedimiento de giro, lo cual podría invalidar los resultados.
- Las dos fracciones más pequeñas permitidas, la 5/8 mm y la 6/10 mm, presentan una mayor dificultad para determinar su grado de revestimiento de forma visual.

Por otro lado, en el método de la botella giratoria se indica que la masa de los áridos debe ser de 510 ± 2 g.; mientras que en el “Boiling Water Test” se indica que la masa de los áridos será de unos 250 g. Por esta razón, se ha tomado como masa de los áridos para la realización del “Boiling Water Test”, la mitad de la masa de los áridos del ensayo de la botella giratoria; es decir, 255 ± 1 g. Esta cantidad se utiliza en la investigación de la influencia del grado de penetración del ligante, en la del tipo de polvo mineral y también, en la del tipo de pretratamiento. De esta forma se utiliza en ambos métodos la proporción de ligante especificada en el método de la botella giratoria ($16,0 \pm 0,2$ g. de betún cada $510,0 \pm 2$ g. de árido, a corregir según la densidad del árido determinada en el capítulo 5).

Con anterioridad a la realización de la mezcla, los áridos y los ligantes se calentaron por separado durante distintos intervalos de tiempo. Así, los ligantes se calentaron entre 2 y 4 horas a la temperatura de mezclado:

- 185°C para el B35/50.
- 170°C para el B50/70.
- 155°C para el B160/220.

Los áridos se calentaron a la misma temperatura que el ligante con el que se iban a mezclar, durante un mínimo de 3 horas.

Finalmente, es preciso señalar que durante el proceso manual de mezclado de los áridos con los distintos tipos de ligante, pudo observarse que para conseguir un recubrimiento del 100% en el AR se necesitaban aproximadamente dos minutos de mezclado; mientras que en el caso de los áridos naturales, era suficiente con un tiempo de mezclado del orden de medio minuto. Además, cuanto menor era la penetración del ligante, resultaba más costoso llegar a alcanzar el 100% de revestimiento. Este dato da una idea de la dificultad para realizar la envuelta de los ARs, frente al resto de los áridos naturales. Esto puede ser debido a la textura porosa que confiere el mortero adherido presente en los ARs. Así, la porosidad e irregularidades superficiales hacen que el AR tenga una mayor superficie que recubrir y que el acceso del ligante a toda esa superficie sea más difícil, al haber entrantes y salientes. Es decir, la textura porosa del mortero adherido a la superficie de los ARs parece ser la principal responsable de que estos tengan una peor adhesividad activa que los naturales. Durante el estudio de la influencia del tipo de polvo mineral (apartado 6.4), con el fin de profundizar en el conocimiento de la facilidad de envuelta (adhesividad activa), se medirán y compararán con detalle todos los tiempos de mezclado.

6.3.2. Resultados de la adhesividad pasiva mediante los ensayos “Boiling Water Test” y de la botella giratoria

En las figuras 6.7 y 6.8 se exponen los resultados obtenidos con el “Boiling Water Test” y con el ensayo de la botella giratoria. En el “Boiling Water Test” se representa el revestimiento (%) para cada tipo de árido y para cada tipo de betún, con observaciones realizadas inmediatamente tras depositar la muestra sobre la toalla blanca y después de

transcurridas 24 horas; mientras que en el ensayo de la botella giratoria se representa el revestimiento tras 6 horas y 24 horas de giro de la botella.

Antes de proceder a analizar los resultados obtenidos, cabe comentar que en el ensayo del “Boiling Water Test” (figura 6.7) la observación realizada inmediatamente tras depositar la muestra en la toalla puede llevar a confusión. La razón fundamental es que la muestra está mojada en el momento de depositarla en la toalla de papel, ya que acaba de extraerse del recipiente con agua en el que se estaba enfriando a temperatura ambiente. Al estar mojada la muestra su color es más oscuro que si estuviera seca. Esto provoca que en ocasiones sea difícil distinguir cuándo la muestra está oscura porque tiene betún y cuándo está oscura porque está mojada. En la observación realizada a las 24 horas esta confusión ya no es posible, pues durante el tiempo transcurrido entre ambas observaciones la muestra se seca. El revestimiento tras depositar la muestra en la toalla es el mismo que a las 24 horas. Sin embargo, en esta última observación, al estar la muestra seca, se ven mejor los recubrimientos y se puede indicar el resultado con mayor precisión.

En cambio, en el ensayo de la botella giratoria (figura 6.8) se aprecian notables diferencias entre el revestimiento de betún observado a las 6 horas de giro y el revestimiento observado a las 24 horas. Esto es así porque en el tiempo transcurrido entre ambas observaciones las botellas siguen girando. Se pone por tanto de manifiesto el efecto negativo de la permanencia de la mezcla suelta en agua junto con el giro de la botella sobre la afinidad entre el árido y el ligante. De hecho, en la observación realizada a las 6 h, los resultados obtenidos para los distintos tipos de áridos y ligantes son muy similares entre sí, lo que da una idea de que el tiempo de ensayo no ha sido suficiente como para permitir analizar la influencia del tipo de árido y del tipo de ligante sobre el revestimiento.

Teniendo en cuenta estas dos consideraciones, parece más adecuado extraer conclusiones de las observaciones realizadas a las 24 horas en ambos ensayos. Así, analizando los resultados que se reflejan en las figuras 6.7b y 6.8b, puede indicarse que:

- De forma general, como era esperado, cuanto mayor es la penetración del ligante, peores revestimientos se obtienen. Por tanto, cuanto mayor es la penetración del ligante, peores son los resultados desde el punto de vista de la adhesividad pasiva. Ambos ensayos aportan las mismas conclusiones en ese sentido. Como es sabido, para una misma temperatura, un betún con elevada penetración presenta una menor

viscosidad que un betún con una baja penetración. Una mayor viscosidad del betún (menor penetración) está asociada a una mayor concentración de moléculas polares. Una mayor concentración de polares se traduce en una mayor resistencia a la acción del agua cuando la mezcla está en servicio (Bagampadde, 2004).

- Para el ensayo de la botella giratoria, esta tendencia se hace especialmente evidente en el caso del AR (figura 6.8b). Esto podría ser debido a la presencia de poros en el mortero de cemento adherido. Así, el ligante contenido en el AR saldría de los poros con mayor dificultad cuanto mayor fuese su viscosidad. En el resto de los áridos, de textura mucho menos porosa, el ligante abandonaría más fácilmente la superficie del árido como consecuencia de la fricción y el golpeteo entre partículas, que se da durante la realización del ensayo. Por eso, en los áridos de cantera no se aprecia tanta diferencia entre los resultados obtenidos con betunes de diferentes penetraciones.
- En el ensayo de la botella giratoria (figura 6.8b) se puede observar como los áridos de naturaleza silíceo (la corneana, el gabro y el esquisto) ofrecen peores resultados en cuanto a revestimiento que el árido de naturaleza caliza (calcita dolomítica), como era previsible.
- Curiosamente, en el caso del ensayo del “Boiling Water Test” (figura 6.7b) no se puede llegar a la misma conclusión, pues hay una excepción: el esquisto. Siendo de naturaleza silíceo, el esquisto ofrece resultados similares a los de la calcita dolomítica. De hecho, es el único árido que con el B35/50 y el B50/70 alcanza los requerimientos mínimos del 85% de recubrimiento.
- En el caso del “Boiling Water Test” (figura 6.7b) el AR es el que ofrece los peores resultados de adhesividad pasiva para cualquier penetración. Solo hay una excepción: con el B160/220 la corneana presenta el peor comportamiento. En cambio, en el ensayo de la botella giratoria (figura 6.8b), el AR es el que mejores resultados ofrece con la penetración 35/50; mientras que con las penetraciones de 50/70 y 160/220 se encuentra en un segundo lugar. Esta diferencia en los resultados podría explicarse tanto en la naturaleza porosa del AR como en la forma de actuar de ambos ensayos. Así, en el de la botella giratoria el betún se desprende como

consecuencia del rozamiento e impacto de unas partículas con las otras. Por ello, el AR tendría una mayor facilidad para mantener el betún adherido a su superficie. Esto es así, porque al ser poroso, su superficie tiene más irregularidades y por tanto es más inaccesible. En el caso del “Boiling Water Test”, puesto que el betún se desprende por calentamiento, la porosidad del AR no tendría tanta influencia. En este caso, sería predominante en su comportamiento el efecto de su composición química y mineralógica.

- Cabe destacar que, a la vista de los resultados obtenidos, la corneana, el árido escogido para fabricar probetas de mezcla bituminosa junto con el AR, parece ser un árido con mala adhesividad pasiva. Este resultado era previsible como se vio en el análisis de la composición mineralógica y fases cristalinas realizado en el apartado 5.2.3. Por tanto, desde el punto de vista de la afinidad árido-ligante, la adhesividad no parece que vaya a mejorar por el hecho de que las probetas de mezcla bituminosa se fabriquen con una mayor cantidad de árido natural. Sin embargo, como se comentó en el capítulo anterior, se ha considerado adecuado escoger este árido natural, ya que presenta una excelente resistencia a la fragmentación.

6.3.3. Influencia del tiempo de ensayo en el método de la botella giratoria

En el ensayo de la botella giratoria resulta interesante ver cómo varía el recubrimiento del árido en función de la duración del experimento. Los resultados obtenidos con el B35/50, el B50/70 y el B160/220, se reflejan en la figura 6.9. Puede observarse como la calcita y el AR son los que presentan un mejor comportamiento a lo largo del tiempo para las tres penetraciones ensayadas. Sin embargo, a medida que aumenta la penetración del ligante, el AR va mostrando que le afecta más el paso del tiempo que a la calcita. Nuevamente la porosidad del AR parece ser la principal responsable de este comportamiento. Así, por un lado, la porosidad favorece que el betún se entrelace mecánicamente con el árido (Abo-Qudais y Al-Shweily, 2007). Por otro lado, cuanto mayor es la penetración del ligante, éste tendrá una mayor facilidad para introducirse dentro de los poros del AR durante el mezclado. De esta forma, el espesor de betún que envuelve al AR será más fino, siendo, por tanto, más fácil retirarlo de la superficie del árido como consecuencia del golpeteo que se produce durante el giro de las botellas.

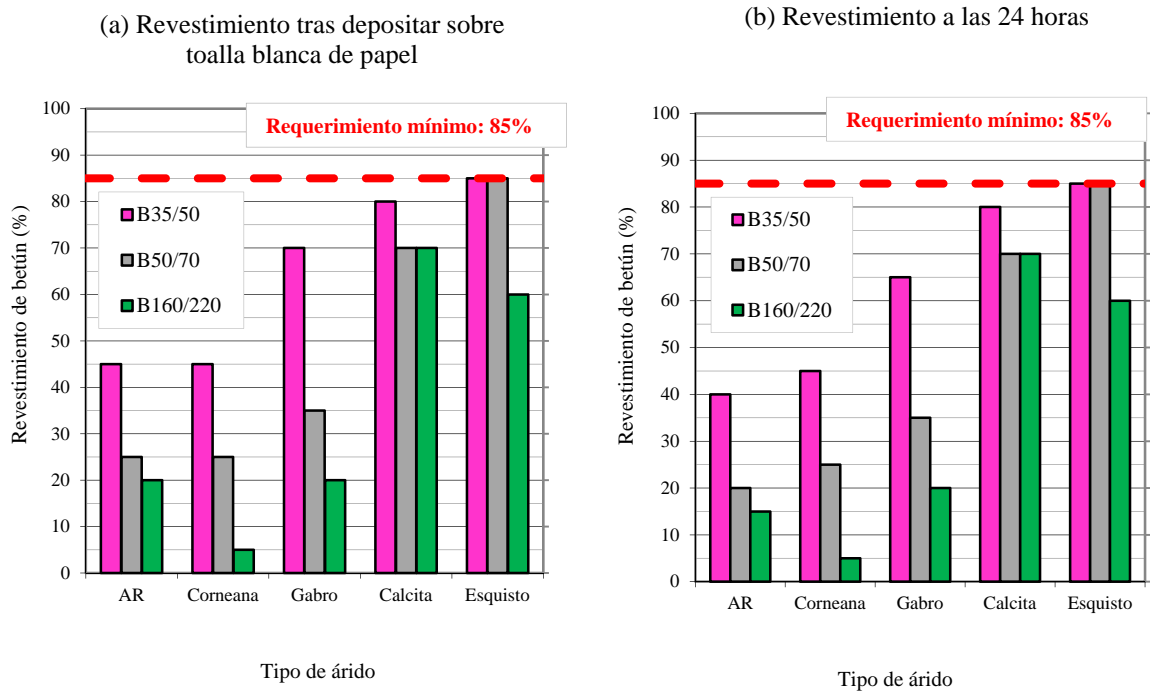


Figura 6.7.- “Boiling Water Test”. Influencia del grado de penetración del ligante: (a) Revestimiento tras depositar sobre toalla blanca y (b) Revestimiento a las 24 h.

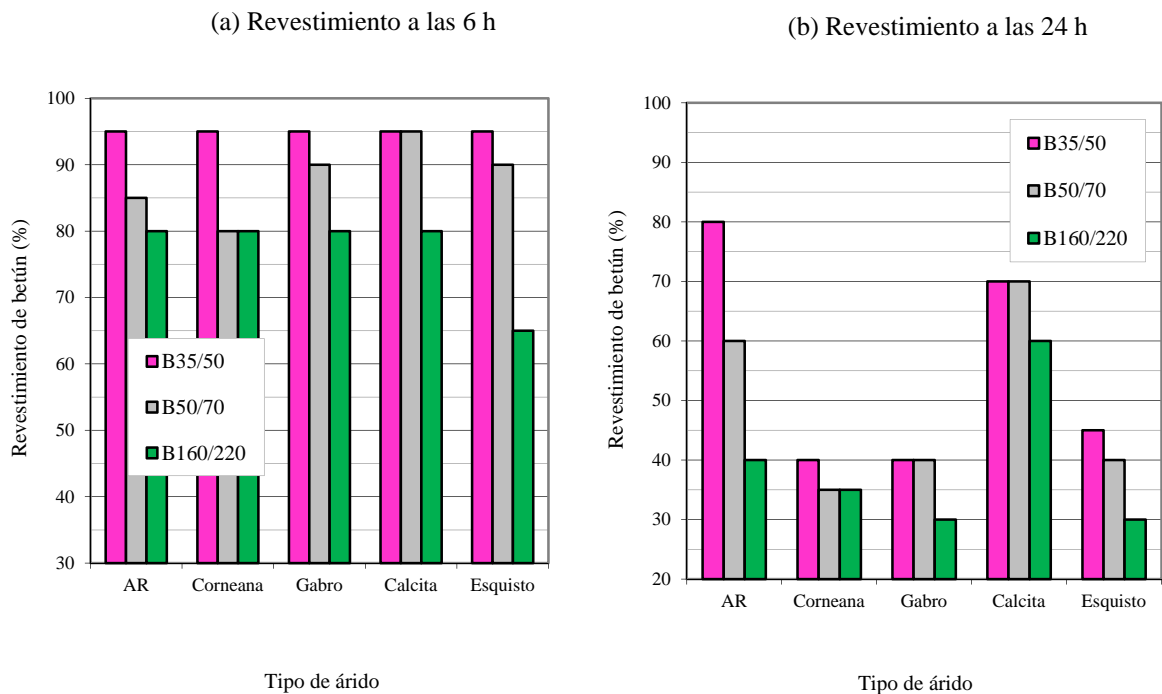


Figura 6.8.- Ensayo de la botella giratoria. Influencia del grado de penetración del ligante: (a) Revestimiento a las 6 h y (b) Revestimiento a las 24 h.

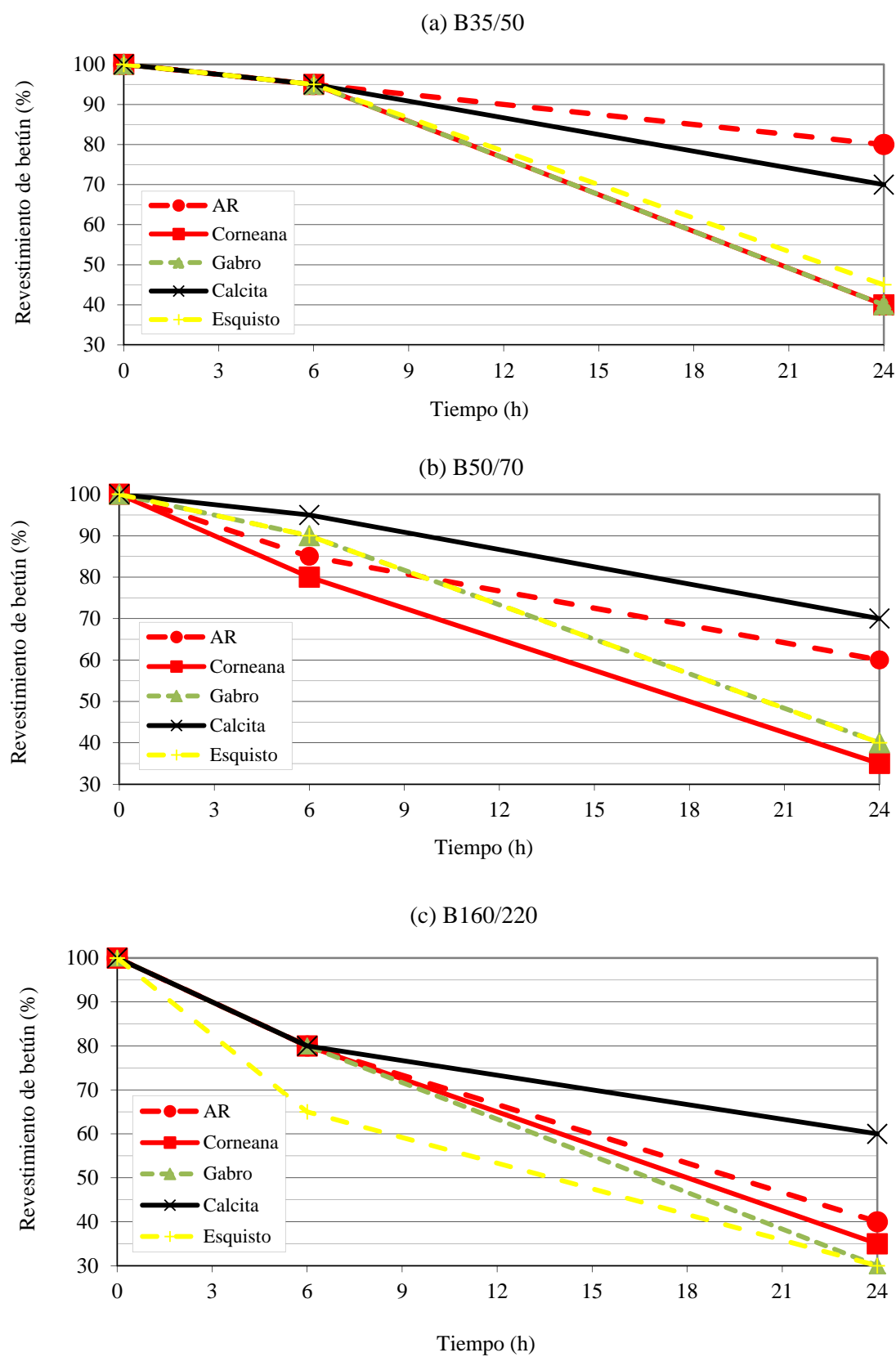


Figura 6.9.- Ensayo de la botella giratoria. Grado de revestimiento de betún en función del tiempo de ensayo: (a) B35/50, (b) B50/70 y (c) B160/220.

El esquisto, el gabro y la corneana, los tres de tipo silíceo, son los áridos a los que más les afecta el tiempo de giro, presentando resultados muy similares. En concreto, puede observarse que para el B50/70, la corneana es el árido que ofrece peores resultados. Por lo que, como ya se comentó anteriormente, este árido presenta una mala adhesividad pasiva.

6.3.4. Análisis estadístico de los resultados del apartado 6.3.2

Con el fin de determinar si la influencia del tipo de árido y de la penetración del betún es estadísticamente significativa en la afinidad entre el árido y el ligante, se ha llevado a cabo un ANOVA de dos factores para el “Boiling Water Test” (tabla 6.1) y otro para el ensayo de la botella giratoria (tabla 6.2). Para ello, se seleccionó el programa Statgraphics Centurion XVI (Statistical Graphics Corporation, Rockville, MD, USA). La variable independiente es el revestimiento del árido a las 24 horas. Los dos factores son: tipo de árido (AR, corneana, gabro, calcita y esquisto) y grado de penetración del betún (B35/50, B50/70 y B160/220). Ambos factores son variables cualitativas mientras que grado de revestimiento es una variable cuantitativa. Se ha realizado el análisis sin interacción.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: penetración	2.110,00	2	20,21	1.055,00	14,72	0,0021
B: árido	7.756,67	4	74,30	1.939,17	27,06	0,0001
Residuos	573,33	8	5,49	71,67		
Total (corregido)	10.440,00	14	100,00			

Tabla 6.1.- ANOVA de dos factores para el ensayo “Boiling Water Test”.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: penetración	653,33	2	18,18	326,67	6,32	0,0225
B: árido	2.526,67	4	70,32	631,67	12,23	0,0017
Residuos	413,33	8	11,50	51,67		
Total (corregido)	3.593,33	14	100,00			

Tabla 6.2.- ANOVA de dos factores para el ensayo de la botella giratoria.

En las tablas 6.1 y 6.2 se presentan los resultados de los dos ANOVA: suma de cuadrados (SC), grados de libertad (GL), porcentaje sobre la suma de cuadrados total (% SCT), cuadrado medio (CM), cociente-F (F) y p-valor (p). En base a los resultados obtenidos de los ANOVA, puede verse que el factor que más influencia tiene en el revestimiento es el

tipo de árido. Es **significativo** ($p < 0,05$) en **ambos ensayos** y explica un 74,30% de la varianza total en el caso del “Boiling Water Test” y un 70,32% en el caso del ensayo de la botella giratoria. El **grado de penetración** del betún también es **significativo** para el ensayo de la **botella giratoria** ($p < 0,05$), explicando tan solo un 18,18% de la varianza total. En el caso del “Boiling Water Test” el grado de penetración también es significativo ($p < 0,05$), explicando tan solo un 20,21% de la varianza total.

Cabe destacar que, como se indicó en el apartado 6.3.2, el **betún de penetración 35/50** es el que ofrece los **mejores resultados de adhesividad pasiva**. En particular, con el AR las diferencias son considerables si se compara con las otras dos penetraciones. Sin embargo durante la realización del mezclado manual (adhesividad activa), se ha visto que resulta más difícil llevar a cabo la envuelta con los ligantes que presentan una menor penetración. Es decir, cuesta más alcanzar un recubrimiento del 100% durante la envuelta con el B35/50 que con el B160/220. Por lo cual la **adhesividad activa** del B35/50 es **peor** que la del B160/220.

Por tanto, el B35/50 ofrece mejores resultados de adhesividad pasiva, pero **peores de adhesividad activa**; mientras que el B160/220 ofrece mejores resultados de adhesividad activa y peores de pasiva. Así para la posterior fabricación de mezclas bituminosas en caliente, se puede considerar más adecuada la utilización del betún de penetración 50/70 pues ofrece unos resultados intermedios de adhesividad activa y pasiva, quedando de esta forma el futuro comportamiento de dichas mezclas del lado de la seguridad. Además, el análisis ANOVA realizado para ambos ensayos indica que el grado de penetración del betún explica una parte de la varianza total pequeña en relación al principal de los factores: el tipo de árido.

6.4. INFLUENCIA DEL POLVO MINERAL EN LA AFINIDAD ÁRIDO - LIGANTE

6.4.1. Descripción del procedimiento seguido en este apartado

Se ha realizado un análisis de la influencia que tiene el tipo de polvo mineral en la afinidad entre el árido y el ligante. El objetivo de este análisis es seleccionar el polvo mineral más adecuado, desde el punto de vista de la sensibilidad al agua, para trabajar con el AR. Para

ello las mezclas sueltas se han preparado con betún B50/70 y los polvos minerales siguientes:

- Polvo mineral procedente del propio árido a ensayar.
- Polvo mineral procedente del propio árido a ensayar + cal apagada.
- Polvo mineral calizo comercial con un 98% de pureza.
- Cemento portland compuesto del tipo CEM II/B-M (V-L) 32,5 N (cemento gris).
- Cenizas volantes.

En todos los casos se fabricó la mezcla suelta con un 4% de polvo mineral sobre el peso total del árido, incluido el polvo mineral. El betún de penetración 50/70 se utilizó en la misma proporción empleada en el apartado anterior, es decir, un 3% sobre mezcla. Las características de todos estos materiales pueden verse en el capítulo 5. Para fabricar la mezcla suelta se siguió el procedimiento descrito en el apartado 6.3.1, con la particularidad de que el polvo mineral y el árido (figura 6.10) se mezclaron con anterioridad a la adición del betún.



Figura 6.10.- Fracción 8/11,2 mm de corneana con un 4% de polvo mineral calizo comercial.

En primer lugar, fue preciso dosificar el porcentaje de cal apagada a utilizar junto con el polvo mineral procedente del propio árido. Para ello se llevaron a cabo ensayos “Boiling Water Test” con AR y diferentes porcentajes de cal apagada (4 muestras sueltas). En esta dosificación se utilizó exclusivamente el AR ya que para los demás áridos (corneana, gabro, esquisto y calcita) se utilizó el mismo porcentaje de cal determinado para el AR. Esta simplificación tiene su razón de ser en que el principal objetivo de utilizar cal es mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas fabricadas con AR. En segundo lugar, para todos los áridos (naturales y reciclado) se realizó el ensayo del “Boiling Water Test”. Cada árido se ensayó con cada uno de los polvos minerales (25 muestras sueltas). Además, se midieron los tiempos de mezclado de las diferentes combinaciones entre áridos y polvos minerales, para tener una idea de la mayor o menor facilidad para realizar la envuelta. En tercer lugar, con todos los polvos minerales se procedió a realizar el ensayo de la botella giratoria, pero trabajando solo con el AR, para así confirmar los resultados obtenidos con el “Boiling Water Test” (5 muestras sueltas).

6.4.2. Dosificación del contenido de cal apagada

Con el fin de dosificar la cantidad idónea de cal apagada a combinar con el polvo mineral procedente del árido, se realizó el citado ensayo del “Boiling Water Test”. En el apartado 6.4.3 todos los polvos minerales procedentes del árido natural se combinarán con el porcentaje de cal determinado en el presente apartado. Sin embargo, este ensayo se realizó exclusivamente con el AR y el polvo mineral procedente del AR. Como se comentó anteriormente, esto se hizo así porque el fin último del análisis de la influencia del tipo de polvo mineral es mejorar la afinidad del AR con el betún. Se trabajó con distintas proporciones de cal en peso sobre el árido: 0%, 1%, 2% y 3%. Así, para la dosificación del porcentaje de cal se prepararon un total de 4 muestras sueltas. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 6.3 adjunta.

Porcentaje de cal s/árido total	0 %	1 %	2 %	3 %
Recubrimiento tras depositar en la toalla blanca de papel (%)	85	95	95	90
Recubrimiento a las 24 horas (%)	75	85	85	80

Tabla 6.3.- Resultados de la dosificación del porcentaje de cal para el AR con el “Boiling Water Test”.

A la vista de la tabla 6.3, el peor resultado en cuanto a recubrimiento se obtiene para el 0% de cal (figura 6.11a). Los mejores resultados de adhesividad se obtienen para porcentajes del 1% y 2% de cal. Ambos porcentajes dan valores similares de recubrimiento, aunque ligeramente mejores en el caso del 1% (figura 6.11b). El 3% da resultados bastante buenos, aunque peores que en el caso del 1% y 2%. Teniendo en cuenta los resultados se ha optado por dosificar las mezclas con un 1% de cal sobre el peso total del árido, pues con una menor cantidad de cal se obtienen resultados similares a los obtenidos con el 2%. Por otro lado, el valor del 1% es el utilizado en la práctica habitual, según la revisión bibliográfica realizada al respecto (Al-Jarallah y Lee, 1987).

6.4.3. Resultados del “Boiling Water Test”

6.4.3.1. Influencia del tipo de polvo mineral en la adhesividad pasiva

En la figura 6.12a se representa el revestimiento obtenido en función del tipo de árido y del tipo de polvo mineral en la observación realizada tras depositar la muestra en la toalla blanca; mientras que en la figura 6.12b se representa el revestimiento obtenido tras 24 horas de reposo. Si se compara esta última figura con la figura 6.7b, puede deducirse que, en general, **utilizar polvo mineral** de cualquier naturaleza **mejora notablemente la afinidad entre el árido y el ligante**. Este resultado era esperado, ya que el polvo mineral mejora la afinidad entre el árido y el ligante por dos razones (Padilla Rodríguez, 2004). La primera es que el polvo mineral rellena los poros del árido impidiendo la entrada de agua en los mismos. La segunda es que algunos polvos minerales tienen una mayor afinidad química con el betún que el árido con el que se combinan.

A modo de ejemplo, en la figura 6.7b el AR presenta un 20% de revestimiento con el betún B50/70; mientras que en la figura 6.12b, el revestimiento oscila entre el 50% (polvo mineral calizo comercial y cenizas volantes) y el 80% (polvo mineral de cemento gris). La única excepción a esta tendencia se da para el esquisto en el que el polvo mineral calizo comercial y el polvo mineral de ceniza volante, arrojan peores resultados que cuando no se utiliza polvo mineral.

(a) 0% de cal



(b) 1% de cal



Figura 6.11.- Recubrimiento del ligante en la dosificación del porcentaje de cal para combinar con el polvo mineral procedente del AR mediante el “Boiling Water Test”. Observación a las 24 horas: (a) 0% de cal y (b) 1% de cal.

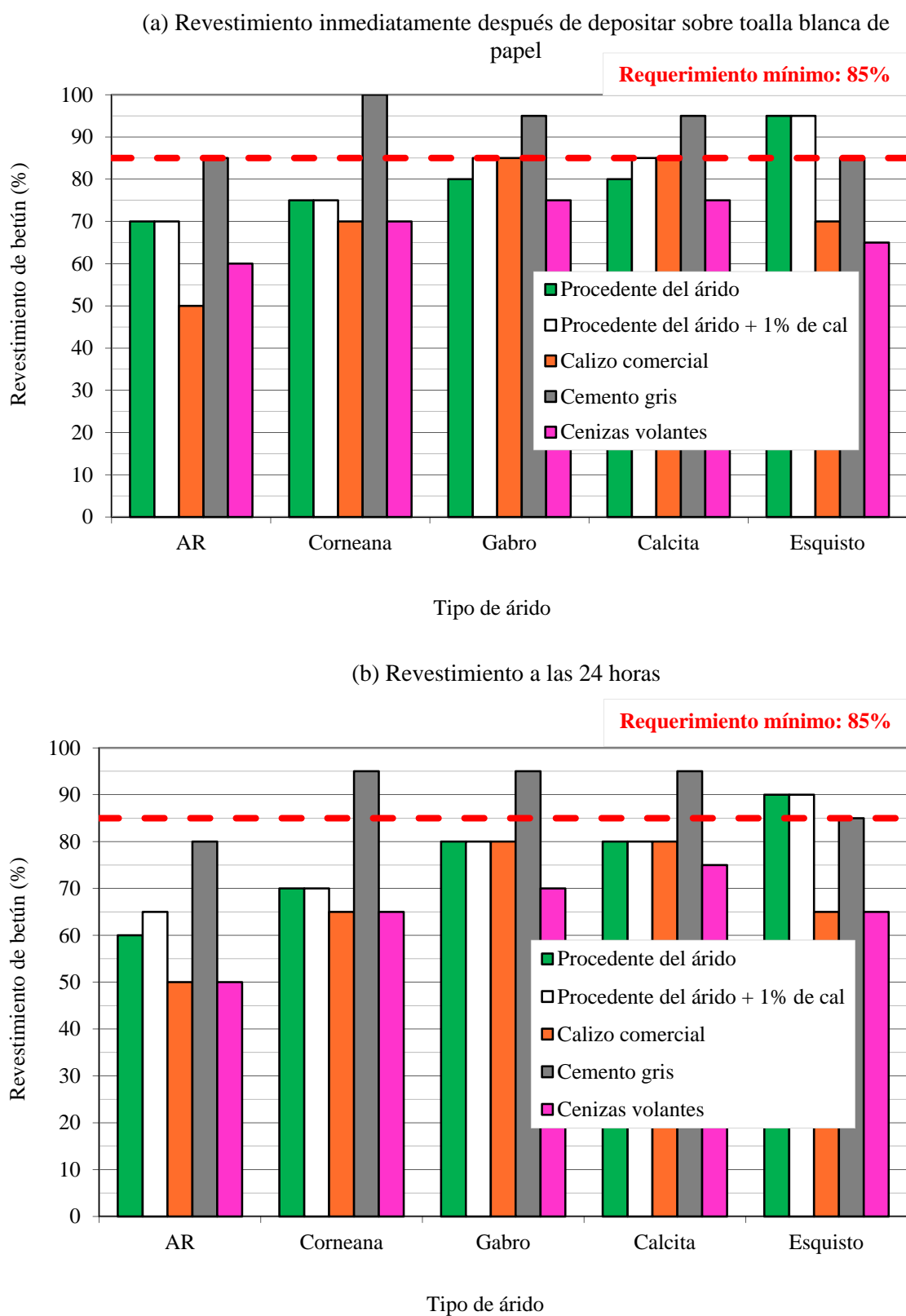


Figura 6.12.- “Boiling Water Test”. Influencia del polvo mineral: (a) Revestimiento tras depositar en toalla y (b) Revestimiento a las 24 horas.

En los áridos estudiados (excepto el esquisto) los mayores revestimientos y, por tanto, los mejores resultados de afinidad, se obtienen si se utiliza como polvo mineral el cemento gris. Además los revestimientos obtenidos con el polvo mineral de cemento gris son muy superiores a los obtenidos con el resto de los polvos minerales utilizados. Así por ejemplo, en el caso del AR (figura 6.12b) el revestimiento conseguido utilizando cemento gris es un 15% superior al conseguido utilizando el siguiente mejor polvo mineral (que en el caso del AR es polvo mineral procedente del AR con un 1% de cal). En las figuras 6.13a y 6.13b se adjuntan unas imágenes en las que se aprecia la clara mejoría en la adhesividad pasiva entre el AR y el ligante al utilizar cemento gris (80% de recubrimiento) frente a utilizar polvo mineral reciclado (60%).

Como se acaba de indicar, la única excepción a este comportamiento la constituye el esquisto. El esquisto con polvo mineral de cemento se encuentra en segunda posición. Aunque presenta un revestimiento a las 24 horas (figura 6.12b) inferior solo en un 5% al de los polvos minerales que se encuentran empatados en la primera posición (polvo mineral procedente del esquisto y polvo mineral procedente del esquisto con un 1% de cal). Por tanto, estaría muy igualado con los dos polvos minerales que mejor funcionan para este tipo de árido.

También puede verse en la figura 6.12b que, salvo para el AR, el polvo mineral procedente del árido consigue el mismo revestimiento que si se combina con un 1% de cal. En el caso del AR el polvo mineral procedente del AR con un 1% de cal, presenta un revestimiento solo un 5% superior al obtenido utilizando exclusivamente polvo mineral del AR. Sin embargo el ensayo con polvo mineral procedente del árido y un 1% de cal en el caso del AR se hizo dos veces, ya que cuando se realizó la dosificación (tabla 6.3) también se estudió este porcentaje. En este caso la diferencia fue del 10%. Por tanto, si se adopta una media de ambos resultados (7,5%) solo se aprecia una pequeña mejoría de la adhesividad derivada de añadir un 1% de cal (sobre el peso total del árido) al polvo mineral natural. Es decir, que apenas se aprecia mejoría al añadir cal al polvo mineral procedente del AR.

(a) AR con polvo mineral de cemento



(b) AR con polvo mineral reciclado



Figura 6.13.- “Boiling Water Test”. Observación a las 24 horas: (a) AR con polvo mineral de cemento y (b) AR con polvo mineral reciclado.

Con el fin de analizar si el tipo de polvo mineral y el tipo de árido influyen de forma estadísticamente significativa en la afinidad entre el árido y el ligante, se ha realizado un ANOVA de dos factores. La variable independiente es el revestimiento del árido a las 24 horas con el “Boiling Water Test”. Los dos factores son: tipo de árido (AR, corneana, gabro, calcita y esquisto) y tipo de polvo mineral (procedente del árido, procedente del árido con 1% de cal, calizo comercial, cemento gris y cenizas volantes). Ambos factores son variables cualitativas mientras que grado de revestimiento es una variable cuantitativa. Se ha realizado el análisis sin interacción.

En base a los resultados obtenidos en el ANOVA (tabla 6.4), puede verse que el factor que más influencia tiene en el revestimiento es el tipo de polvo mineral, ya que es significativo ($p < 0,05$) y explica un 47,66% de la varianza total. Como era previsible, el tipo de árido también es significativo ($p < 0,05$), explicando un 37,85% de la varianza total. Por tanto, el análisis estadístico confirma que tanto el tipo de árido como el tipo de polvo mineral tienen influencia en la adhesividad entre el árido y el ligante.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: árido	1.504,00	4	37,85	376,00	10,44	0,0002
B: polvo mineral	1.894,00	4	47,66	473,50	13,15	0,0001
Residuos	576,00	16	14,49	36,00		
Total (corregido)	3.974,00	24	100,00			

Tabla 6.4.- ANOVA de dos factores para determinar la influencia del tipo de árido y tipo de polvo mineral sobre el revestimiento obtenido con el “Boiling Water Test”.

6.4.3.2. Análisis de la adhesividad activa mediante la determinación del tiempo de mezclado

Durante el proceso manual de mezclado de los áridos con los distintos tipos de polvo mineral, pudo observarse que para conseguir un recubrimiento del 100% del AR se necesitaban unos tiempos sustancialmente mayores que para el resto de los áridos. En la figura 6.14 se indican los tiempos de mezclado para los diferentes áridos y los diferentes polvos minerales utilizados, pudiendo observarse lo siguiente:

- Los tiempos de mezclado del AR son mayores. Como mínimo son del orden de 1,5 veces los tiempos de mezclado requeridos en el resto de los áridos, para cualquier

tipo de polvo mineral. En la mayor parte de los casos son del orden del doble o más. Es decir, la adhesividad activa del AR es peor que la de los otros áridos. Esto da una idea de la dificultad que puede dar el mezclado en planta de estos áridos reciclados con el betún. Como se ha comentado anteriormente, en el apartado 6.3.3, el mortero adherido a la superficie del árido en el AR parece ser el principal responsable de este comportamiento.

- En el caso de la utilización de polvo mineral procedente del árido incluso se llega a unos tiempos de mezclado del AR de un orden seis veces superior a los tiempos empleados en el resto de los áridos.
- También puede observarse que el polvo mineral calizo comercial, el polvo mineral cemento y el polvo mineral ceniza volante son los que presentan tiempos de mezclado más bajos para la totalidad de los áridos.

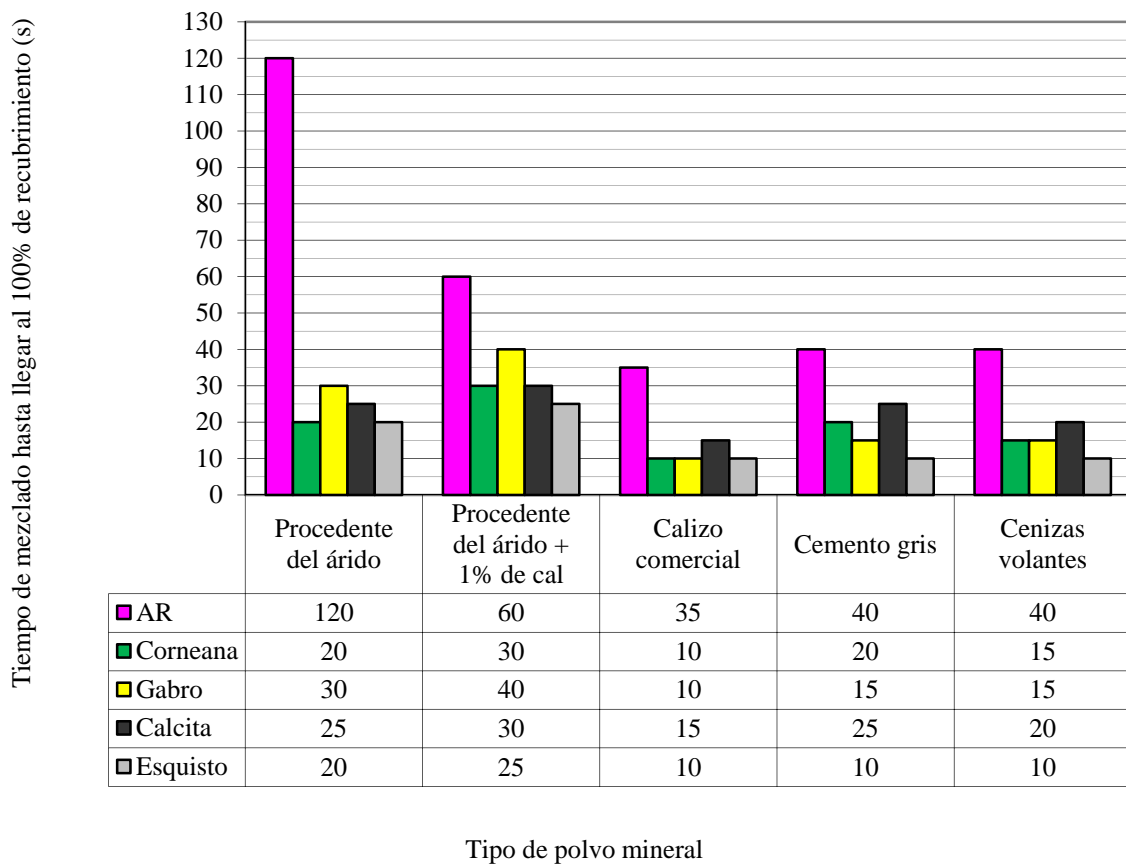


Figura 6.14.- Tiempo de mezclado manual hasta llegar al 100% de recubrimiento, en función del tipo de árido y del tipo de polvo mineral.

Las dos primeras observaciones ponen de manifiesto la dificultad para realizar la envuelta de AR, frente al resto de los áridos. Como se acaba de comentar, la elevada porosidad del mortero de cemento que presenta adherido este tipo de árido, parece ser la principal responsable de este comportamiento, aunque también la presencia de impurezas (yeso, etc) podría afectar a los tiempos de mezclado.

Para determinar si la influencia del tipo de árido y del tipo de polvo mineral es estadísticamente significativa en los tiempos de mezclado y, por tanto, en la adhesividad activa, se ha realizado un ANOVA de dos factores (tabla 6.5). La variable independiente es el tiempo de mezclado manual hasta obtener un revestimiento del 100%. Los dos factores son: tipo de árido (AR, corneana, gabro, calcita y esquisto) y tipo de polvo mineral (natural, natural con 1% de cal, calizo comercial, cemento gris y cenizas volantes). Ambos factores son variables cualitativas mientras que el tiempo de mezclado es una variable cuantitativa. Se ha realizado el análisis sin interacción.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: árido	6.356,00	4	50,62	1.589,00	7,36	0,0015
B: polvo mineral	2.746,00	4	21,87	686,50	3,18	0,0422
Residuos	3.454,00	16	27,51	215,88		
Total (corregido)	12.556,00	24	100,00			

Tabla 6.5.- ANOVA de dos factores para el análisis de la influencia en el tiempo de mezclado del tipo de árido y tipo de polvo mineral.

En base a los resultados del ANOVA puede verse que tanto el tipo de árido como el tipo de polvo mineral son significativas ($p < 0,05$). El tipo de árido explica un 50,62% de la varianza total; mientras que el tipo de polvo mineral explica únicamente un 21,87%.

Al analizar las figuras 6.12 y 6.14 de forma conjunta, puede observarse que no existe una relación directa entre los tiempos de mezclado (adhesividad activa) y el grado de revestimiento a las 24 horas (adhesividad pasiva). Así, por ejemplo, al utilizar polvo mineral de ceniza volante se obtienen tiempos de mezclado muy bajos (figura 6.14) para la totalidad de los áridos y, sin embargo, es el polvo mineral que consigue peores recubrimientos a las 24 horas (figura 6.12). En cambio, en el caso del polvo mineral de cemento también se obtienen tiempos de mezclado muy bajos (figura 6.14), pero es el

polvo mineral que consigue mejores recubrimientos a las 24 horas (figura 6.12). Es decir, puede afirmarse que no existe relación entre la adhesividad activa y la adhesividad pasiva.

6.4.4. Resultados de adhesividad pasiva según el ensayo de la botella giratoria

Finalmente, para contrastar resultados, utilizando exclusivamente AR con betún B50/70, se ha llevado a cabo la realización del ensayo de la botella giratoria para la totalidad de los polvos minerales. En la figura 6.15 adjunta pueden verse los resultados obtenidos tras la realización del citado ensayo.

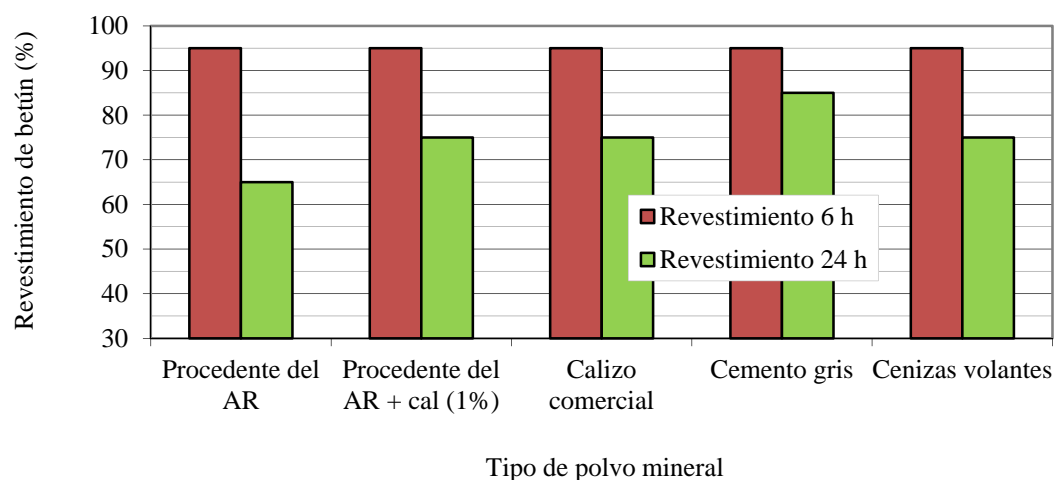


Figura 6.15.- Ensayo de la botella giratoria. Revestimiento en función del tipo de polvo mineral empleado con los ARs.

A las 24 horas, es el cemento gris el que arroja mejores resultados, con un revestimiento del 85%. Este resultado es acorde con el obtenido en el ensayo del “Boiling Water Test” (figura 6.12). Por ello se considera que el **cemento gris** es el **más adecuado** de cara a **mejorar la adhesividad entre el AR y el ligante**.

El polvo mineral calizo comercial, el polvo mineral ceniza y la combinación de polvo mineral procedente del AR con un 1% de cal, ocupan la segunda posición, con un revestimiento a las 24 horas del 75%. En último lugar se encuentra el polvo mineral procedente del AR, con un revestimiento a las 24 horas del 65%. Por tanto, **no parece adecuado, de cara a mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con AR, emplear el polvo mineral procedente del AR**. Estos resultados no son acordes con lo que se ha visto en el estado del arte. Esta aparente incoherencia puede deberse a que aunque hay características comunes a todos los ARs de tipo hormigón

procedentes de RCD, cada uno de ellos tiene sus propias particularidades. Por ello el **estudio en profundidad de cada tipo de AR** se hace **necesario** para poder utilizarlo en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.

A la vista del análisis de los resultados, dado que el polvo mineral de cemento de tipo **CEM II/B-M (V-L) 32,5 N** ofrece los mejores resultados de revestimientos (adhesividad activa) tanto con el AR como en la mayor parte de los áridos naturales ensayados y dado que utilizando el polvo mineral de cemento se obtienen buenos tiempo de mezclado (adhesividad pasiva), se ha optado por **utilizar este tipo de polvo mineral en la posterior fabricación de las mezclas bituminosas en caliente.**

6.5. INFLUENCIA DEL PRETRATAMIENTO DEL AR EN LA AFINIDAD ÁRIDO - LIGANTE

En primer lugar, para analizar la influencia del pretratamiento sobre la adhesividad del AR se realizó el “Boiling Water Test”. Se utilizó el betún B50/70 y no se empleó ningún tipo de polvo mineral en su fabricación, para poder estudiar el efecto del pretratamiento sobre el árido de forma exclusiva. Los tres pretratamiento analizados fueron:

- Reposo en estufa de los áridos tras realizar el mezclado con betún, a la temperatura de mezclado (170°C). Con ello se pretende facilitar la absorción de ligante por parte del AR. Se analizaron cinco tiempos de reposo en estufa: 0, 1, 2, 3 y 4 horas. Así, se analizaron cinco variedades dentro de este pretratamiento.
- Inmersión del AR en lechada de cal. Se estudiaron tres tipos de lechada: 20%, 30% y 40% de cal en agua destilada. El AR se dejó sumergido en cada lechada durante diferentes períodos de tiempo: 1 hora, 1 día (24 horas) y 1 semana (168 horas) para cada una de las lechadas. Así se analizaron un total de nueve variantes dentro de este pretratamiento.
- Preenvolta del AR con emulsión bituminosa ECL-2d (en porcentajes del 3%, 4%, 5% y 6% sobre la masa de AR). Por tanto, para este pretratamiento se analizaron cuatro variantes.

En segundo lugar se llevó a cabo la realización del ensayo de la botella giratoria durante 48 horas, con el fin de corroborar y contrastar los resultados obtenidos con el “Boiling Water

Test”. Para el ensayo de la botella giratoria se analizaron también los tres pretratamientos, pero solo con la variante de cada uno de ellos que mejores resultados ofreció en el “Boiling Water Test”.

Finalmente, entre los tres pretratamientos, se seleccionaron dos para la posterior fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Se consideró conveniente no seleccionar un único pretratamiento, sino dos. Así se podría posteriormente comprobar su efectividad mediante la realización de ensayos de tracción indirecta tras inmersión, exigidos por el PG-3 y correlacionar los resultados del citado ensayo con los del “Boiling Water Test” y los de la botella giratoria.

6.5.1. Resultados de adhesividad pasiva con el “Boiling Water Test”

6.5.1.1. Pretratamiento de reposo en estufa tras realizar el mezclado

El primero de los pretratamientos ensayados consistió en realizar el mezclado del AR (sin polvo mineral) y del ligante (B50/70) y dejar reposar la mezcla suelta fabricada en la estufa, a la temperatura de mezclado (170°C), durante diferentes períodos de tiempo. Como se dijo anteriormente, se han estudiado cinco tiempos de reposo en estufa: 0, 1, 2, 3 y 4 horas. Por tanto se han analizado un total de cinco mezclas sueltas.

El objetivo del presente pretratamiento es el de permitir que el AR absorba una mayor cantidad de ligante y se mejore así su adhesividad al facilitar que toda la superficie de árido quede cubierta de ligante, sin dejar fisuras por las que entre el agua, y reducir la porosidad disminuyendo a su vez los huecos accesibles al agua.

En la figura 6.16 se exponen los resultados obtenidos. Como puede verse, **a partir de 2 horas de permanencia en la estufa**, los resultados de **revestimiento mejoran notablemente**, llegando a ser del 90%, frente al 50% alcanzado con 1 hora de permanencia en la estufa y al 20% alcanzado con 0 horas de permanencia en estufa (observación a las 24 horas). Los **mejores resultados** se obtienen para tiempos de permanencia en estufa de **3 y 4 horas**, en los que se observa un revestimiento del 95%. De todas formas, es importante señalar que el resultado obtenido con 4 horas de permanencia en estufa fue ligeramente superior al obtenido a las 3 horas; pero dado que los resultados se expresan con una aproximación del 5%, no es apreciable en la figura 6.16 esta pequeña diferencia.

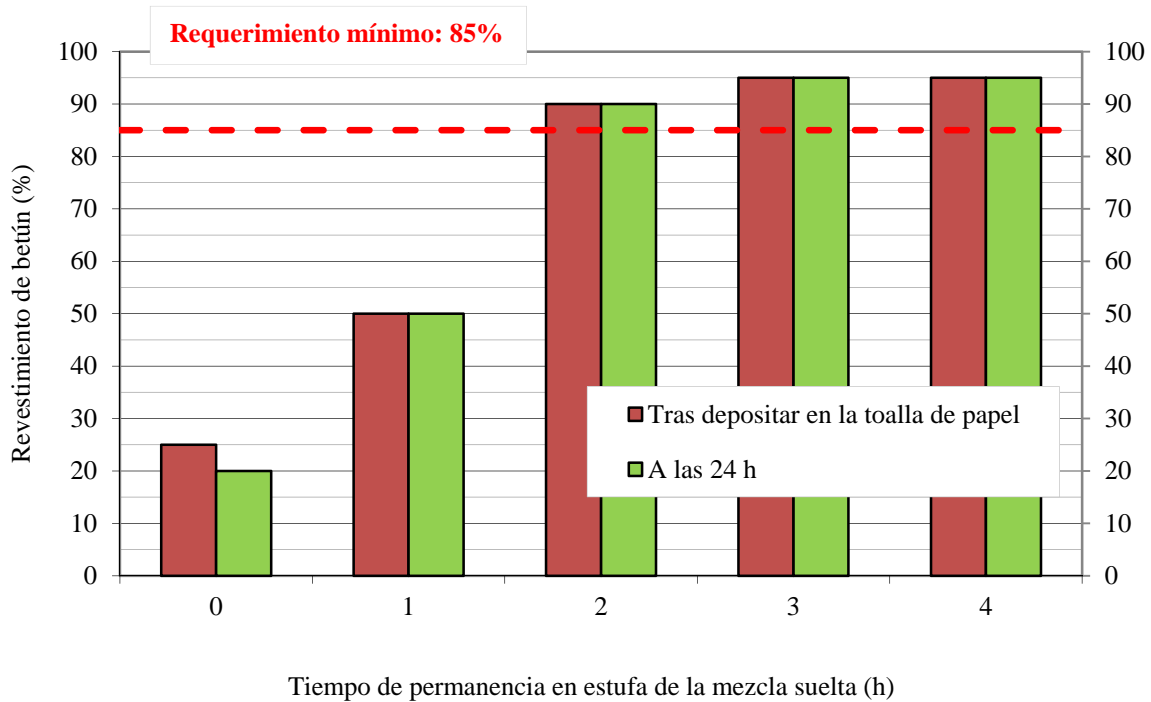


Figura 6.16.- “Boiling Water Test”. Pretratamiento de reposo en estufa. Revestimiento en función del tiempo de permanencia en estufa de la mezcla suelta.

En la figura 6.17 se adjuntan unas imágenes en las que puede verse claramente cómo mejora el revestimiento del AR al dejarlo absorber betún durante 4 horas en la estufa (figura 6.17a) frente a no dejarlo reposar (figura 6.17b), es decir, dejarlo 0 horas en estufa.

6.5.1.2. Pretratamiento consistente en la mezcla del AR con lechada de cal

En este pretratamiento, sobre las muestras de AR se vertieron tres tipos de lechada de cal:

- Lechada tipo 1: 60% de agua destilada y 40% de cal CL-90 S, en peso.
- Lechada tipo 2: 70% de agua destilada y 30% de cal CL-90 S, en peso.
- Lechada tipo 3: 80% de agua destilada y 20% de cal CL-90 S, en peso.

Como se mencionó anteriormente, cada una de las lechadas se vertió sobre una muestra de AR y se dejó que el AR absorbiese la lechada durante 1 hora, 24 horas (1 día) y 168 horas (1 semana) respectivamente. Por tanto, se prepararon un total de 9 mezclas de AR con lechada.

(a) AR con 4 horas de reposo



(b) AR con 0 horas de reposo



Figura 6.17.- “Boiling Water Test”. Observación a las 24 horas: (a) AR con 4 horas de reposo en la estufa y (b) AR con 0 horas de reposo en estufa.

El objetivo del presente pretratamiento es el de permitir que el AR absorba parte de la lechada de agua destilada con cal, de tal forma que, una vez pretratado, presente en sus poros y en su superficie una cierta cantidad de cal. Así, el fin último de este pretratamiento es el de conseguir que la excelente afinidad química de la cal con el betún, redunde en una mejor afinidad del AR con el ligante.



Figura 6.18.- Aspecto solidificado de la lechada tipo 1 en comparación con las lechadas tipo 2 y 3.

Durante la realización de esta primera fase del pretratamiento, se encontró que la lechada tipo 1, que como se ha dicho con anterioridad presenta un 40% de cal en peso, era muy poco fluida (figura 6.18), resultando muy difícil su absorción por parte del AR, por lo cual se descartó. Consecuentemente, a efectos de realizar el ensayo de afinidad, únicamente se prepararon 6 muestras de AR con lechada de cal.

En las lechadas tipo 2 y tipo 3, tras los correspondientes tiempos de absorción de la lechada por parte del AR, se retiró el exceso de lechada, mediante escurrimiento en un cestillo perforado y centrifugación en el mismo cestillo (figura 6.19). La única excepción a este procedimiento se produjo con la lechada tipo 2, con la muestra de AR que se dejó durante 1 semana (168 horas) sumergida. Esta muestra quedó solidificada (figura 6.20), por lo que para retirar el exceso de lechada solidificada fue necesario añadir agua al cestillo utilizado para el escurrimiento y centrifugación (figura 6.21). Como se ha comentado no ocurrió lo mismo con el resto de las muestras ensayadas.



Figura 6.19.- Ecurrimiento del exceso de lechada en cestillo. Lechada tipo 3, con 1 semana (168 horas) de absorción.



Figura 6.20.- Aspecto solidificado de la lechada tipo 2 tras 1 semana (168 horas) de absorción.



Figura 6.21.- Retirada del exceso de lechada tipo 2 solidificada tras 1 semana (168 horas) de absorción, con ayuda de agua.



Figura 6.22.- Aspecto del AR con lechada de cal tras secado en estufa. Lechadas 2 y 3. Tiempo de absorción de 1 hora y 24 horas.

A continuación las seis muestras se secaron en estufa, hasta masa constante (figura 6.22), a $110\pm 5^{\circ}\text{C}$. Con las 6 muestras resultantes y una muestra de AR sin pretratar, se procedió a realizar el “Boiling Water Test”, con ligante del tipo B50/70 y sin polvo mineral, resultando un total de 7 mezclas sueltas. Los resultados obtenidos se indican en la tabla 6.6 y se representan en la figura 6.23.

Tipo de lechada	% de cal	Tiempo de absorción	Revestimiento	
			Tras depositar en la toalla de papel (%)	A las 24 h (%)
2	30	1 h	95	90
3	20	1 h	90	85
2	30	24 h	90	85
3	20	24 h	90	75
2	30	1 semana (168 h)	90	90
3	20	1 semana (168 h)	95	90
Sin pretratamiento			25	20

Tabla 6.6.- Resultados obtenidos en el ensayo “Boiling Water Test” tras someter al AR a un pretratamiento con lechada de cal.

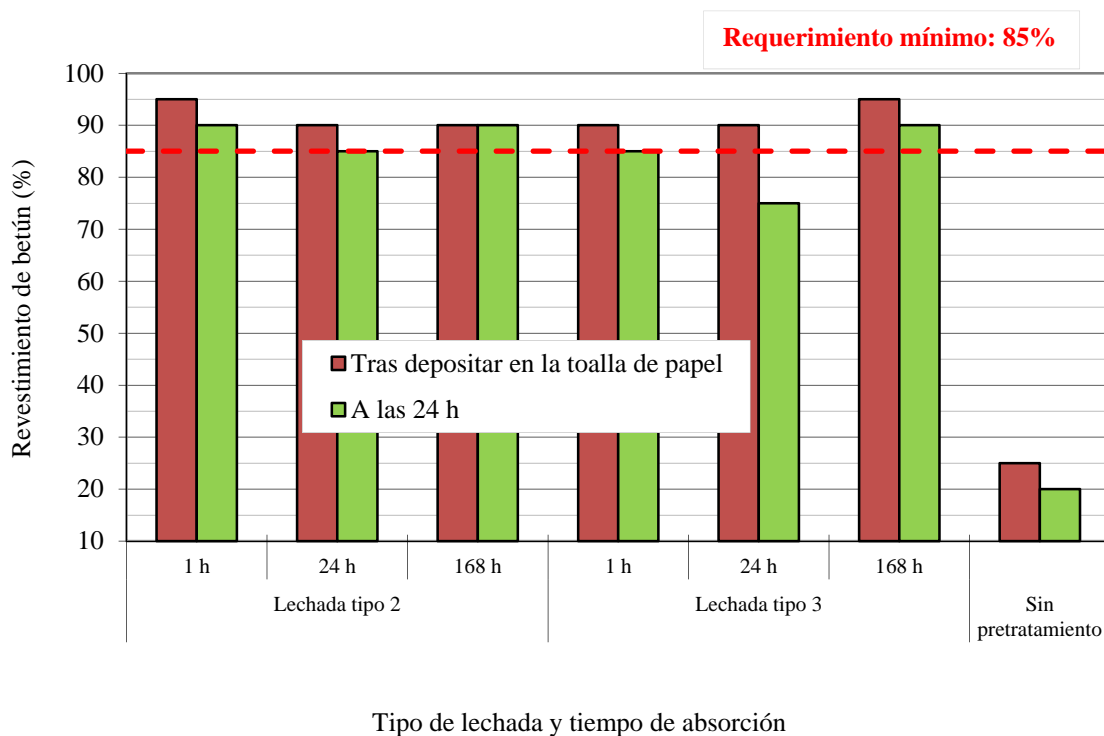


Figura 6.23.- Resultados obtenidos en el ensayo “Boiling Water Test” tras someter al AR a un pretratamiento con lechada de cal.

Analizando los resultados de la tabla 6.6 y la figura 6.23, puede verse que con el pretratamiento con lechada de cal se obtienen mejores recubrimientos que en el caso de los áridos sin pretratar. A modo de ejemplo, en la figura 6.24 se incluyen dos imágenes en las que queda patente la diferencia de revestimiento que presenta el AR con pretratamiento de lechada tipo 2 con 1 hora de absorción (figura 6.24a) frente al AR sin pretratar (figura 6.24b). La mejoría experimentada al aplicar el pretratamiento es claramente apreciable.

Además, las 6 muestras pretratadas con lechada de cal muestran resultados muy parecidos entre sí. En la observación realizada a las 24 horas puede verse que, salvo la lechada tipo 3 con 24 horas de absorción, todas las muestras fabricadas con AR llegan al 85% de revestimiento requerido en este ensayo. Entre todos ellos, los mejores recubrimientos a las 24 horas se obtienen para los tres siguientes casos: porcentajes del 20% y 30% de cal con absorción de 1 semana y porcentaje del 30% de cal con absorción de 1 hora.

Con el fin de determinar si el porcentaje de cal y el tiempo de absorción tienen una influencia estadísticamente significativa en la afinidad entre el árido y el ligante, se ha realizado un ANOVA de dos factores (tabla 6.7). La variable independiente es el revestimiento a las 24 horas obtenido con el “Boiling Water Test” y los dos factores son: porcentaje de cal (20% y 30%) y tiempo de absorción de la lechada (1 hora, 24 horas y 168 horas). Tanto ambos factores como la variable independiente son variables cuantitativas. Se ha realizado el análisis sin interacción.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: absorción	108,33	2	63,41	54,17	4,33	0,1875
B: % cal	37,50	1	21,95	37,50	3	0,2254
Residuos	25,00	2	14,63	12,50		
Total (corregido)	170,83	5	100,00			

Tabla 6.7.- ANOVA de dos factores para analizar la influencia del porcentaje de cal y del tiempo de absorción en el revestimiento.

(a) AR con lechada con un 30% de cal, 1 h de absorción



(b) AR sin pretratamiento



Figura 6.24.- “Boiling Water Test”. Revestimiento a las 24 horas: (a) AR con lechada con un 30% de cal, 1 h de absorción y (b) AR sin pretratamiento.

Como puede verse en la tabla 6.7 ninguno de los dos factores son significativos ($p>0,05$). Por tanto, el porcentaje de cal y el tiempo de absorción no producen diferencias estadísticamente significativas en los resultados. Este resultado es acorde con la interpretación de los resultados realizada anteriormente, ya que se había visto que los resultados obtenidos (tabla 6.6 y figura 6.23) son muy similares entre sí para las diferentes variantes del pretratamiento con lechada. A la vista de los resultados obtenidos en el “Boiling Water Test” y en el análisis estadístico, se ha seleccionado la lechada tipo 2 (cal al 30%), con absorción de 1 hora, como el pretratamiento con lechada más adecuado. Esto se hace así porque el ahorro de tiempo es considerable frente a los otros dos casos (168 horas de absorción en ambos).

6.5.1.3. Pretratamiento de preenvuelta del AR con emulsión bituminosa ECL-2d

Como se mencionó anteriormente, un total de cuatro muestras de AR se han pretratado con emulsión bituminosa ECL-2d, en diferentes porcentajes sobre la masa de árido. La preenvuelta del AR con ECL-2d permite que los poros del AR queden obstruidos ante la posible entrada del agua. Además, la emulsión que recubre el AR puede colaborar a mejorar su afinidad química con el betún. Por todo ello, el fin último de este pretratamiento es mejorar la adhesividad entre el AR y el betún. Los porcentajes de emulsión ensayados fueron del 3,0%, 4,0%, 5,0% y 6,0%. Con las 4 muestras resultantes y una muestra de AR sin pretratamiento, se procedió a realizar el “Boiling Water Test”. En este ensayo, al igual que con los pretratamientos anteriores, se utilizó ligante del tipo B50/70. Los resultados obtenidos son los que se indican en la tabla 6.8 y se representan en la figura 6.25.

% de ECL-2d	Revestimiento	
	Tras depositar en la toalla de papel (%)	A las 24 h (%)
3,0	90	80
4,0	90	85
5,0	90	90
6,0	90	90
Sin pretratamiento	25	20

Tabla 6.8.- Resultados obtenidos en el ensayo “Boiling Water Test” tras someter al AR a un pretratamiento con emulsión bituminosa ECL-2d.

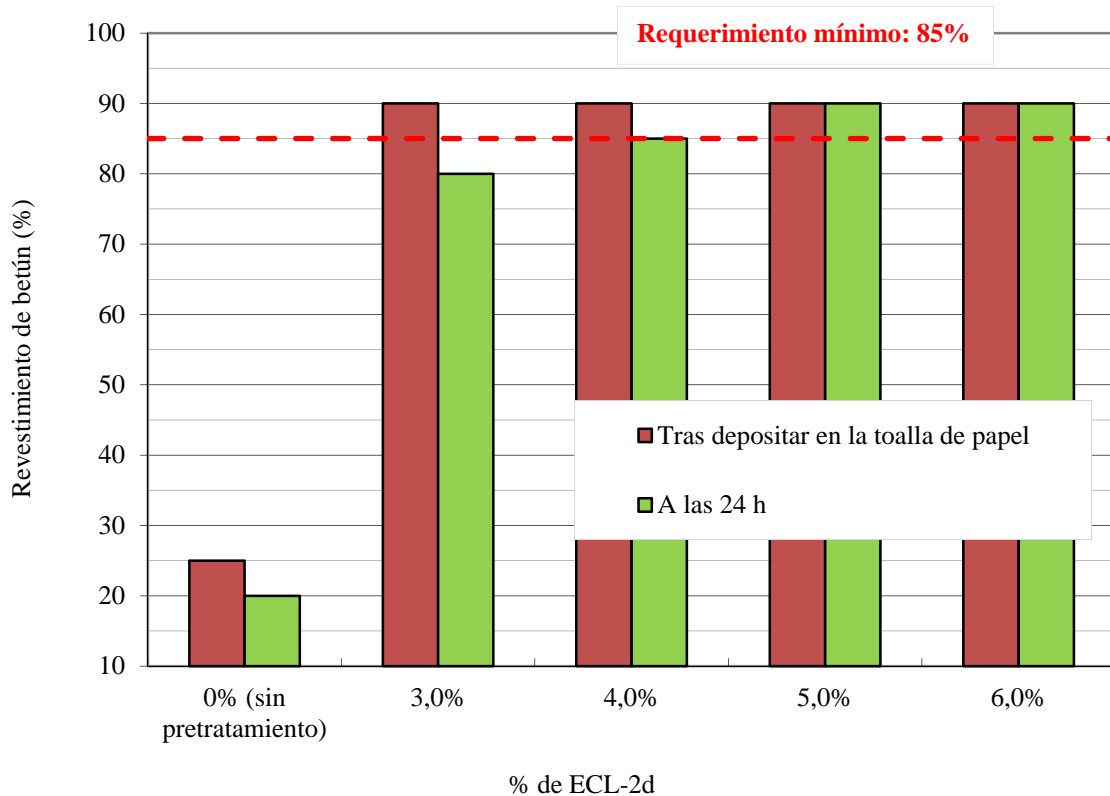


Figura 6.25.- Resultados obtenidos en el ensayo “Boiling Water Test” tras someter el AR a un pretratamiento con emulsión bituminosa ECL-2d.

Analizando los resultados de la tabla 6.8 y la figura 6.25, puede verse que en la observación realizada a las 24 horas sin pretratamiento el recubrimiento es muy bajo (20%). Con cualquier porcentaje de emulsión que se le añada al AR se produce una notable mejoría. Así, como mínimo se obtiene un revestimiento a las 24 horas del 80% (para un 3% de ECL-2d). A partir del 4% de ECL-2d se alcanza el 85% exigido en este ensayo. Los mejores recubrimientos a las 24 horas se obtienen para los porcentajes del 5% y 6% de ECL-2d. Puesto que ambos resultados son muy similares, se ha seleccionado como pretratamiento más adecuado el del 5%, ya que utilizó una menor cantidad de emulsión.

En la figura 6.26 puede verse como el recubrimiento obtenido para el AR con un 5% de ECL-2d (figura 6.26a) es muy superior al obtenido para el AR sin pretratar (figura 6.26b).

(a) AR preenvuelto con un 5% de ECL-2d



(b) AR sin pretratamiento



Figura 6.26.- Revestimiento a las 24 horas con el “Boiling Water Test”: (a) AR preenvuelto con un 5% de ECL-2d y (b) AR sin pretratamiento.

6.5.2. Resultados de adhesividad pasiva con el ensayo de la botella giratoria

Para contrastar la efectividad de los pretratamientos seleccionados con el “Boiling Water Test”, se realizaron ensayos de la botella giratoria durante 48 horas con los siguientes pretratamientos:

- AR con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa a 170°C.
- AR con pretratamiento de lechada de cal al 30% y 1 hora de absorción.
- AR con pretratamiento del 5% de ECL-2d.

Además, también se realizó el ensayo a una muestra de AR sin pretratamiento (mezcla de control). En todos los casos se utilizó betún B50/70. Como puede verse en la figura 6.27, el ensayo se continuó hasta las 48 horas de giro.

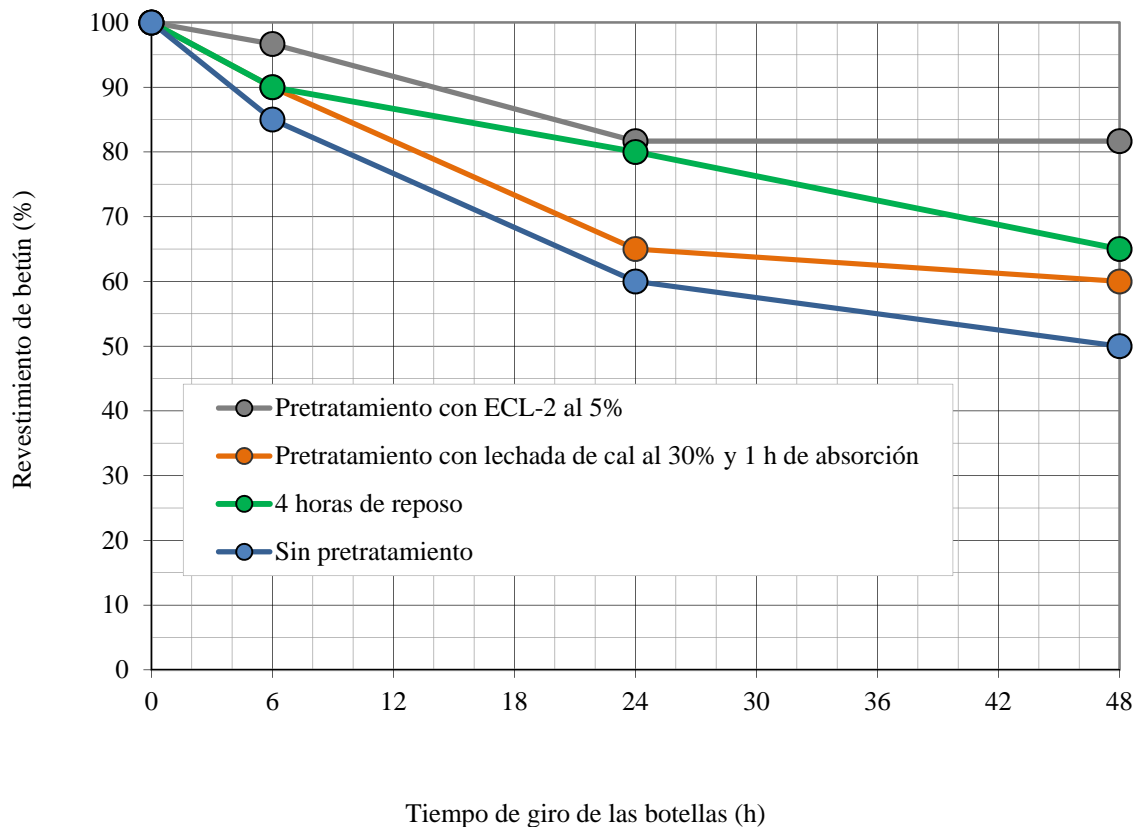


Figura 6.27.- Ensayo de la botella giratoria. Comparación entre varios pretratamientos aplicados al AR.

En relación con estos pretratamientos, en la figura 6.27 puede observarse lo siguiente:

- En el caso del pretratamiento con ECL-2d, los resultados obtenidos son los mejores, llegando a obtenerse a las 6 horas de observación un recubrimiento del 97%, a las 24 horas un 82% y a las 48 horas también un 82%. En la figura 6.28 se adjuntan dos imágenes. En ellas puede observarse la diferencia de recubrimientos obtenidos a las 48 horas con el ensayo de la botella giratoria para el AR sin pretratamiento (figura 6.28a) y para el AR con el pretratamiento de preenvuelta del AR con ECL-2d (figura 6.28b). Puede observarse que sin pretratamiento (figura 6.28a) hay piedras prácticamente sin nada de ligante mientras que otras aparecen mejor recubiertas. Esto pone de manifiesto que el recubrimiento del AR es variable debido a su propia heterogeneidad.
- El siguiente mejor pretratamiento sería el de 4 horas de reposo en estufa, con un 90% de revestimiento a las 6 horas, un 80% a las 24 horas y un 65% a las 48 horas.
- El pretratamiento consistente en la preenvuelta con lechada tipo 2 durante 1 hora de absorción, también arroja mejores resultados de afinidad que los obtenidos para el AR sin pretratar. Sin embargo, es el pretratamiento que produce peores revestimientos.
- Puede observarse que, a las 24 horas, la diferencia de recubrimientos obtenida entre la muestra que se sometió a una preenvuelta con ECL-2d y la muestra sin pretratamiento fue de un 22%, frente al 70% obtenido con el “Boiling Water Test” (tabla 6.8). También puede observarse que la diferencia entre la muestra que se dejó reposar 4 horas y la muestra sin pretratamiento (0 horas de reposo) fue de un 20%, frente al 75% de diferencia mostrado en los resultados del “Boiling Water Test” (figura 6.16). Está claro que, como se ha comentado anteriormente, en el ensayo de la botella giratoria la porosidad del AR tiene una mayor influencia en la adhesividad entre el betún y el árido que en el “Boiling Water Test”.

En vista de los resultados obtenidos **se han seleccionado los dos siguientes pretratamientos: AR preenvuelto con un 5% de ECL-2d y tiempo de reposo en la estufa de 4 horas tras su mezclado a 170°C**. Se ha optado por adoptar el máximo tiempo de permanencia ensayado, con el fin de garantizar la óptima absorción de ligante por parte del AR en la totalidad de las mezclas ensayadas. Estos resultados se contrastarán en el

capítulo 7 mediante el ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Así, podrá verse si existe alguna correlación entre el ensayo de tracción indirecta tras inmersión y los ensayos de “Boiling Water Test” y botella giratoria. Además también se analizará en el capítulo 7 cómo afecta el tiempo de permanencia en estufa a la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con AR.



Figura 6.28.- Botella giratoria tras 48 horas de giro: (a) AR sin pretratamiento (50%) y (b) AR preenvuelto con un 5% de ECL-2d (82%).

Finalmente, tras la selección de los pretratamientos, resulta ilustrativo comparar el aspecto del AR tras realizar la envuelta con el betún, en el caso del AR sin pretratar y en el caso de los dos pretratamientos seleccionados. Para ello se han tomado tres imágenes justo antes de realizar el ensayo de la botella giratoria. Así, en la figura 6.29 se han incluido tres fotografías en las que puede observarse el aspecto del AR sin pretratar (figura 6.29a), preenvuelto con ECL-2d (figura 6.29b) y tras 4 horas de reposo en estufa (figura 6.29c). Las tres imágenes se han tomado tras realizar la envuelta con un 3% de betún B50/70 hasta alcanzar un 100% de recubrimiento y dejar enfriar a temperatura ambiente.

Puede observarse como en el caso del AR sin pretratamiento (figura 6.29a) y del AR preenvuelto con ECL-2d (figura 6.29b) el aspecto es más brillante que en el caso del AR que se ha dejado 4 horas en estufa (figura 6.29c). Esto es así como consecuencia de la absorción de ligante que ha sufrido este último y, por tanto, la mayor cantidad de ligante efectivo de los dos primeros. Es decir, la mayor cantidad de ligante que queda envolviendo la superficie del AR sin pretratar y pretratado con ECL-2d. Resulta curioso que habiendo una mayor cantidad de ligante efectivo en el caso del AR sin pretratar que en el caso del AR que ha sufrido el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, el revestimiento tras 24 horas de giro sea superior para el AR que ha sufrido el pretratamiento. Esto es una evidencia de la eficacia del pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa a la hora de mejorar la afinidad entre el AR y el betún. Por tanto, la absorción de betún por parte del AR ha contribuido a mejorar el comportamiento del mismo frente a la acción del agua. Como se ha comentado anteriormente, el betún absorbido obstruye los poros y reduce la aparición de posibles fisuras, evitando así la entrada de agua.

También puede observarse que en la muestra que se ha dejado reposar 4 horas en estufa (figura 6.29c) hay áridos con aspecto más mate que otros, lo cual quiere decir que **no todos los componentes del AR absorben betún por igual**. Por tanto, el **pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, no será igual de efectivo para todos los materiales incluidos en el AR**. Esto ya se vio en la figura 6.28a, en la que se apreciaban partículas casi sin revestimiento de betún y partículas con un revestimiento mucho mayor.

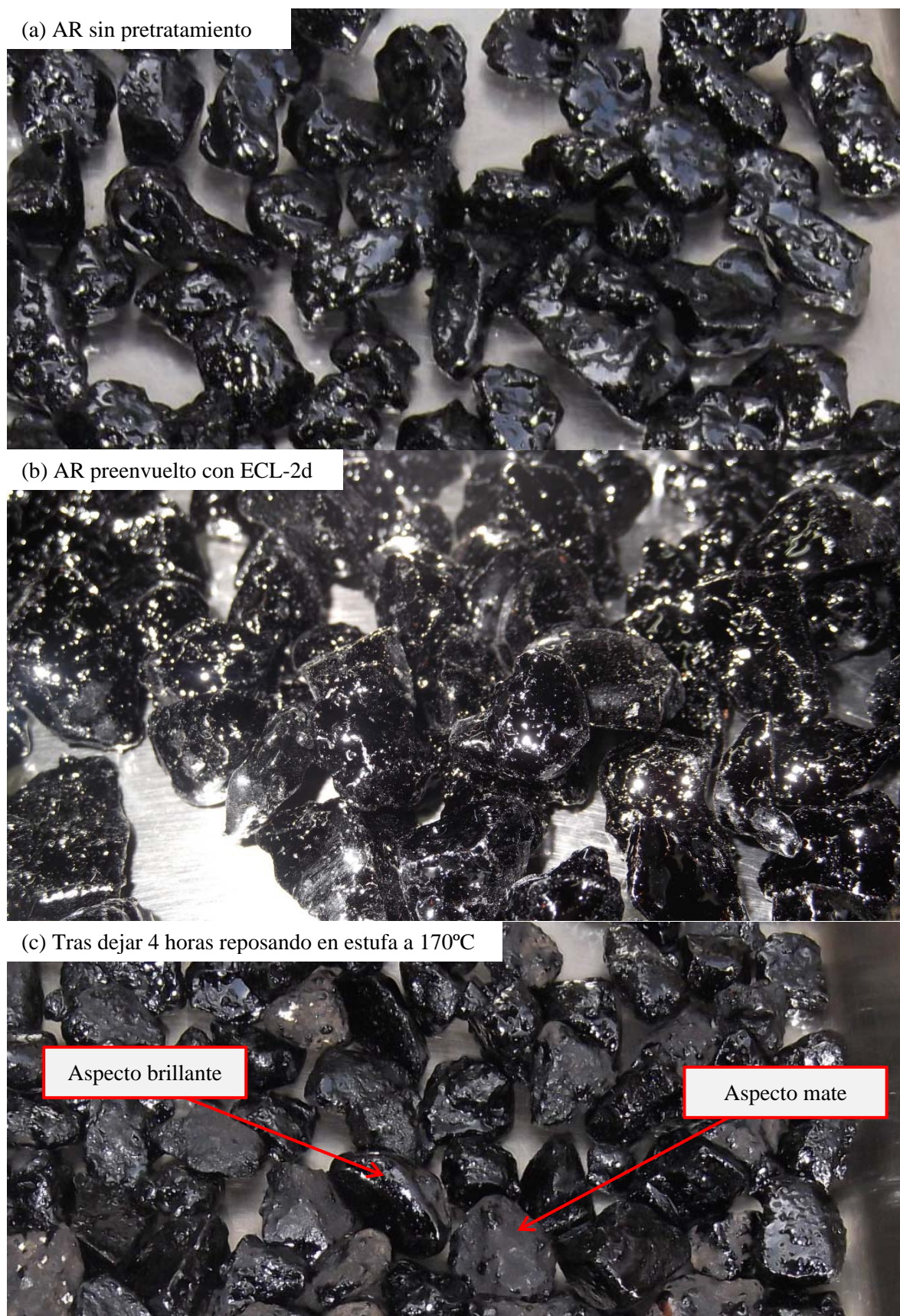


Figura 6.29.- Detalle de la fracción 8/11,2 del AR tras realizar la mezcla con un 3% de betún B50/70: (a) AR sin pretratamiento, (b) AR preenvuelto con ECL-2d y (c) Tras dejar 4 horas reposando en estufa a 170°C.

Capítulo 7

ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los trabajos realizados en el “Laboratorio de Caminos” de la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la Universidade da Coruña para estudiar el comportamiento frente a la acción del agua de mezclas bituminosas en caliente para capa de base fabricadas con áridos reciclados (ARs) de tipo hormigón procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD). Para realizar este estudio se han llevado a cabo ensayos de laboratorio de aplicación habitual en nuestro país para mezclas bituminosas en caliente convencionales tales como el ensayo Marshall (MOPT, 1992) y el ensayo de tracción indirecta tras inmersión (AENOR, 2006c). Como se ilustra en la figura 7.1, para abordar este análisis se han seguido los siguientes pasos:

- En una primera etapa se llevaron a cabo ensayos de tracción indirecta tras inmersión para comparar entre sí los dos pretratamientos seleccionados en el capítulo anterior: **4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d**. Además se analizó la influencia del tiempo de reposo en estufa ensayando a tracción indirecta mezclas que se dejaron reposar 0, 1, 2, 3 y 4 horas. El fin último de esta primera etapa es el de seleccionar el pretratamiento más ventajoso tanto desde el punto de vista de la sensibilidad al agua como desde el punto de vista práctico.
- En una segunda etapa se procedió a dosificar mezclas bituminosas en caliente mediante el ensayo Marshall. Se dosificaron mezclas sin pretratamiento y mezclas a las que se les aplicó el pretratamiento que a priori resultó más aconsejable según el análisis realizado en la primera etapa. Una vez dosificadas las mezclas, se llevaron a cabo ensayos de tracción indirecta tras inmersión con el contenido óptimo de ligante. El fin último de esta segunda etapa es el de comparar las mezclas sin pretratamiento con las mezclas dosificadas con el pretratamiento más beneficioso, así como optimizar los resultados. Además, el ensayo Marshall también permitió dar una idea sobre el posible comportamiento mecánico de las mezclas.
- En la tercera y última etapa se llevaron a cabo varios ensayos de tracción indirecta, con el fin último de analizar la influencia del contenido de ligante y confirmar los resultados obtenidos en las dos primeras etapas.

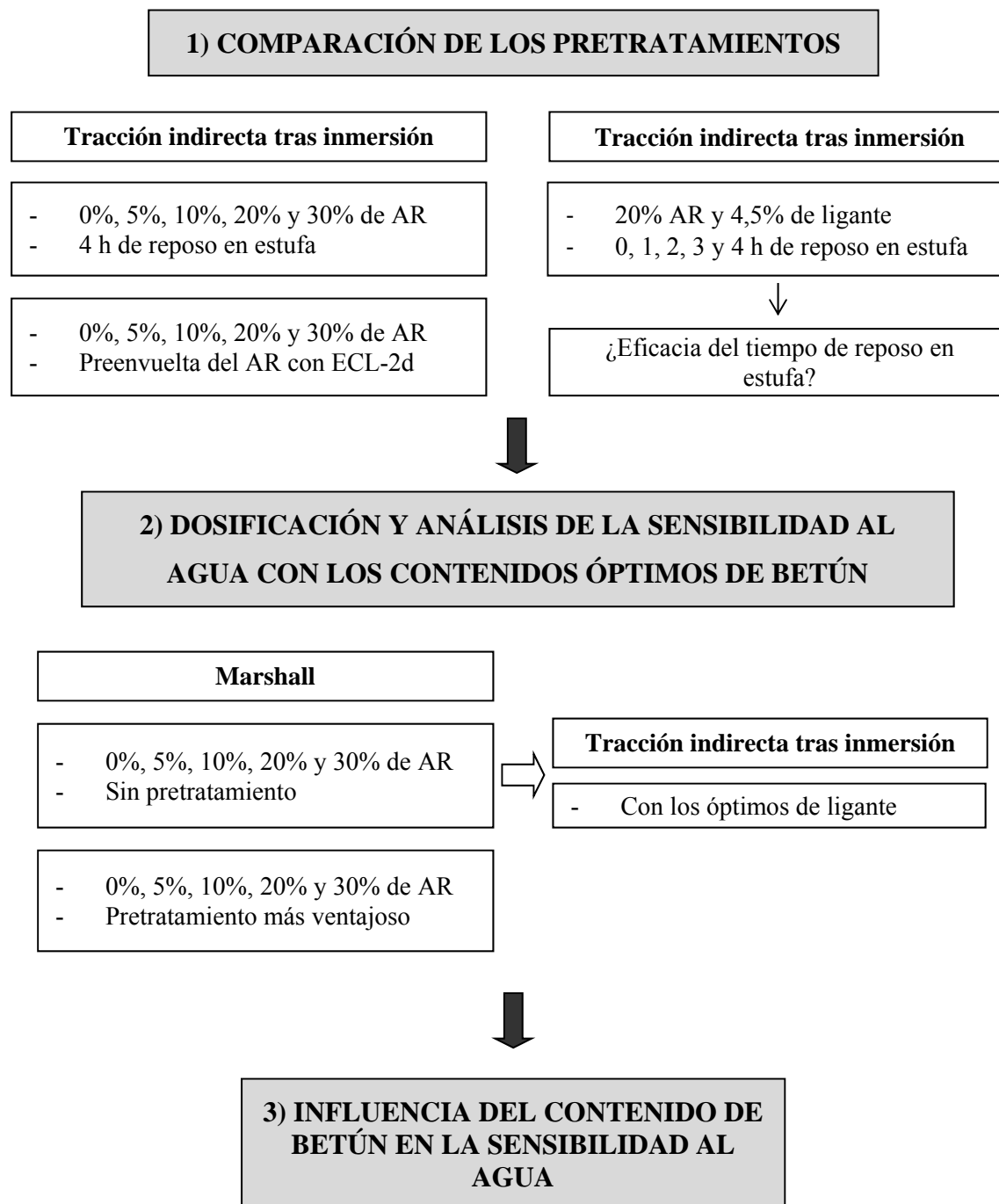


Figura 7.1.- Procedimiento seguido para analizar la sensibilidad al agua.

7.2 DESCRIPCIÓN DE LA MEZCLA BITUMINOSA ANALIZADA

7.2.1 Tipo de mezcla

Se ha llevado a cabo el análisis de la sensibilidad al agua con una mezcla AC 22 base G (antigua G-20); es decir, una mezcla bituminosa en caliente, de tamaño máximo de árido de 22 mm, con granulometría gruesa y de utilización en capa de base. De entre todas las capas del firme en las que se puede disponer mezcla bituminosa (rodadura, intermedia y base) se ha escogido la capa de base por dos razones fundamentales:

- La primera razón es que las especificaciones exigidas a los áridos que forman parte de las mezclas bituminosas para capa de base son inferiores a las que se les exigen a los áridos que se emplean para mezclas bituminosas en capas superiores. Se han fabricado mezclas con sustitución parcial del árido natural por AR, a priori con peores características físicas que el natural (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009). Por ello, tal y como se ha apuntado en el capítulo 4, resulta más adecuado investigar la posibilidad de emplear este tipo de áridos en la fabricación de mezclas bituminosas para capa de base.
- Una segunda razón para escoger la capa de base, es que los espesores permitidos por la norma 6.1-IC para capas de base son superiores a los permitidos para capas de rodadura e intermedia. Así, el volumen de AR a utilizar, para un mismo porcentaje de sustitución, será superior en la capa de base. Por tanto, se daría salida a una mayor cantidad de AR, colaborando de forma más eficaz a resolver el problema medioambiental generado por los RCD.

Cabe comentar que, entre todas las posibilidades que ofrece el PG-3, se ha escogido este tipo de mezcla bituminosa por ser de utilización habitual para capas de base y presentar un tamaño máximo de árido (22 mm) apto para ser compactada utilizando los equipos disponibles en el momento de realización de la presente tesis en el Laboratorio de Caminos de la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la Universidade da Coruña.

En la figura 7.2 puede verse la granulometría adoptada para la mezcla bituminosa escogida, así como el huso superior y el inferior dados por el PG-3. Se ha procurado seleccionar la granulometría de la AC 22 base G para que se sitúe aproximadamente en la

media entre el huso inferior y el superior. Sin embargo, en el tamiz de 22 mm no se ha adoptado la media, sino el valor del huso superior para evitar tamaños de árido mayores que 22 mm. Además, como se ha visto en el estado del arte, el AR, por su elevada absorción, podría necesitar una mayor cantidad de ligante. Por ello, se ha adoptado en el polvo mineral (tamiz de 0,063 mm) un valor superior a la media: un 4%. Así se podría cumplir, en la medida de lo posible, con la relación ponderal entre los contenidos de polvo mineral y ligante, recomendada en el PG-3. No cumplir con esta relación debido a un exceso de ligante podría ser contraproducente, llegando a perjudicar así la adhesividad. Por otro lado, como es bien sabido, aumentar el contenido de polvo mineral, de gran superficie específica, podría tener efectos adversos, porque se consume más betún. Por todo ello se espera que las mezclas bituminosas fabricadas con AR demanden una mayor cantidad de ligante que las mezclas convencionales.

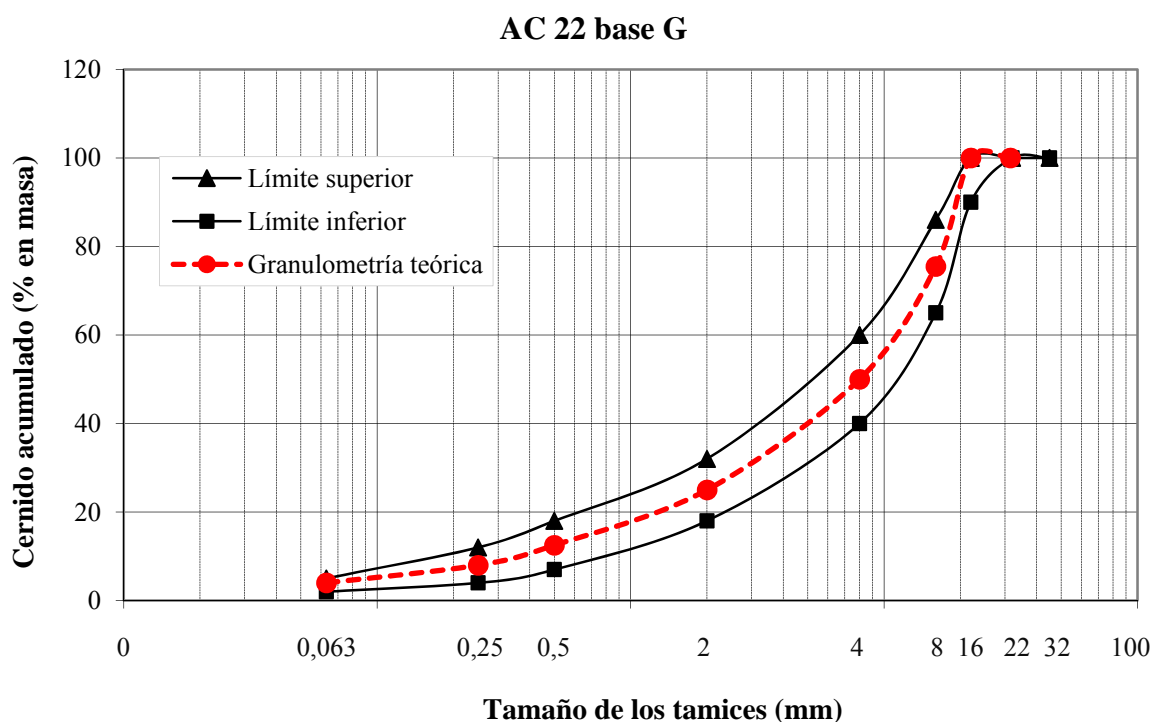


Figura 7.2.- Ubicación dentro del huso de la granulometría de la AC 22 base G.

7.2.2 Sustitución parcial por AR

La mezcla bituminosa se ha fabricado con árido natural y AR de tipo hormigón procedente de RCD. Para ello se han realizado sustituciones parciales del árido natural por AR en porcentajes del 0%, 5%, 10%, 20% y 30% sobre la masa total de árido incluido el polvo

mineral. La sustitución del 5%, 10% y 20% se ha llevado a cabo solamente en la fracción granulométrica 8/16 mm; mientras que la sustitución del 30% se ha realizado en la totalidad de la fracción 8/16 mm y en parte de la fracción 4/8 mm.

Tal y como se ha comentado en el capítulo 5, la sustitución de árido natural por AR en las fracciones más gruesas podría introducir grandes dispersiones en los resultados debido a la heterogeneidad del material. Por otro lado, tal y como también se ha indicado en el capítulo 5, el árido fino tiene una mayor superficie específica y es más sensible a fenómenos de adhesividad, presentando además valores de absorción de agua muy elevados, del orden de unas 10 veces superior a la de un árido convencional. Además, dado que resulta más difícil retirar impurezas de forma visual y manual en la fracción más fina, no parece adecuado realizar la sustitución en la fracción inferior a 4 mm. Esta conclusión se ve reforzada por el hecho de que cuanto menor es el tamaño de AR a utilizar, el contenido de mortero presente en el mismo es mayor, lo cual afecta negativamente a las propiedades del AR (Sánchez de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2009).

7.2.3 Materiales empleados

Como se ha indicado en los capítulos 5 y 6, se ha escogido como árido natural la corneana o cornubianita, de mala adhesividad, pero con una excelente resistencia a la fragmentación. En la elección del árido natural se ha preferido dar mayor importancia a una buena resistencia a la fragmentación en lugar de a una adecuada adhesividad, ya que, como se ha visto, la primera es necesaria para combinar el árido natural con el AR. Además, utilizando un árido de mala adhesividad la investigación se queda del lado de la seguridad. Es decir, si el árido de mala adhesividad cumple con los requisitos de resistencia frente a la acción del agua para fabricar mezclas bituminosas, también lo hará el de buena adhesividad. Como AR se ha utilizado el de tipo hormigón procedente de RCD de la planta de TEC REC y como ligante un betún de penetración B50/70 procedente de Venezuela. Se han utilizado dos tipos de polvo mineral: el CEM II/B-M (V-L) 32,5 N (cemento gris) y el polvo mineral natural procedente de la corneana. En uno de los pretratamientos se ha utilizado también emulsión bituminosa de tipo ECL-2d. Todos estos materiales se han descrito con detalle en el capítulo 5.

7.2.4 Estabilidad granulométrica

De la revisión bibliográfica realizada en el capítulo 4 se ha visto que algunas investigaciones han constatado el cambio en la distribución granulométrica de las mezclas bituminosas fabricadas con AR tras la mezcla y compactación de la misma, atribuyendo este hecho a la debilidad del mortero de cemento adherido.

Para contrastar esta afirmación se han fabricado probetas de mezcla bituminosa con un 4% de betún B50/70, polvo mineral de cemento y porcentajes de AR del 0%, 5%, 10%, 20% y 30%, compactadas con 75 golpes por cara mediante la maza Marshall. A partir de las probetas así fabricadas se ha realizado un análisis granulométrico de los áridos recuperados mediante el ensayo de “Contenido de ligante en mezclas bituminosas” según la norma NLT-164/90 (MOPT, 1992). En la figura 7.3 puede observarse como tras la centrifugación, los áridos quedaron completamente limpios de betún.



Figura 7.3.- Áridos recuperados (de la mezcla AC 22 base G fabricada con un 5% de AR en la fracción 8/16 mm).

En la figura 7.4 se ha plasmado la granulometría teórica de la mezcla bituminosa, así como las obtenidas a partir de los áridos recuperados para las mezclas con porcentajes de AR del 0%, 5%, 10%, 20% y 30%. Así mismo se han representado los límites superior e inferior del huso granulométrico de la AC 22 base G indicados en el PG-3. Puede observarse que las granulometrías obtenidas con los áridos recuperados difieren de la granulometría teórica en los cinco casos de porcentajes de sustitución de árido natural por AR. Además, las mayores diferencias se producen en el tamiz de 8 mm, de tal forma que para el 5% de AR hay una diferencia en el cernido de un 3% en el citado tamiz, para el 10% de AR de un 3,6%, para el 20% de AR de un 5,5% y para el 30% de AR de un 10,3%. Es decir, en el tamiz de 8 mm, a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de árido natural por AR se producen diferencias crecientes en el cernido. Como se explicó anteriormente, la sustitución del AR se produce en la fracción 8/16 mm para todos los porcentajes de sustitución excepto para el del 30%. En este porcentaje además de sustituirse el AR en la citada fracción también se sustituyó en la 4/8 mm. Puesto que las mayores diferencias entre la granulometría de los áridos recuperados y la original se producen en el tamiz de 8 mm, se confirma que **el AR se fragmenta más que el árido natural durante las operaciones de mezclado y compactación** de las mezclas bituminosas. Por tanto, puede decirse que este tipo de mezclas presentan **mayor inestabilidad granulométrica que las convencionales**.

Se ha visto que estas diferencias, en el tamiz de 8 mm, son más acusadas en el caso del mayor porcentaje de sustitución de AR (el 30%). En este caso incluso la granulometría final obtenida tras mezclar y compactar llega a superar ligeramente el límite del huso superior en el tamiz de 8 mm. En este tamiz, el límite superior del huso dado por el PG-3 indica que el porcentaje cernido es del 60%; mientras que en la granulometría final obtenida tras la recuperación del árido el porcentaje cernido es del 60,3%. Por tanto, dada la inestabilidad granulométrica del AR y que la granulometría final del porcentaje del 30% de AR se encuentra rozando el límite superior, es conveniente **limitar el porcentaje de sustitución del AR** a este valor, es decir, un 30%.

Como era de esperar, debido al propio proceso de fabricación de las mezclas, también se producen diferencias de cernido en el caso del porcentaje de sustitución del 0%. Sin embargo, en este caso las mayores diferencias con la granulometría teórica no se dan en el tamiz de 8 mm, si no en el de 16 mm, con una diferencia del 4,9%.

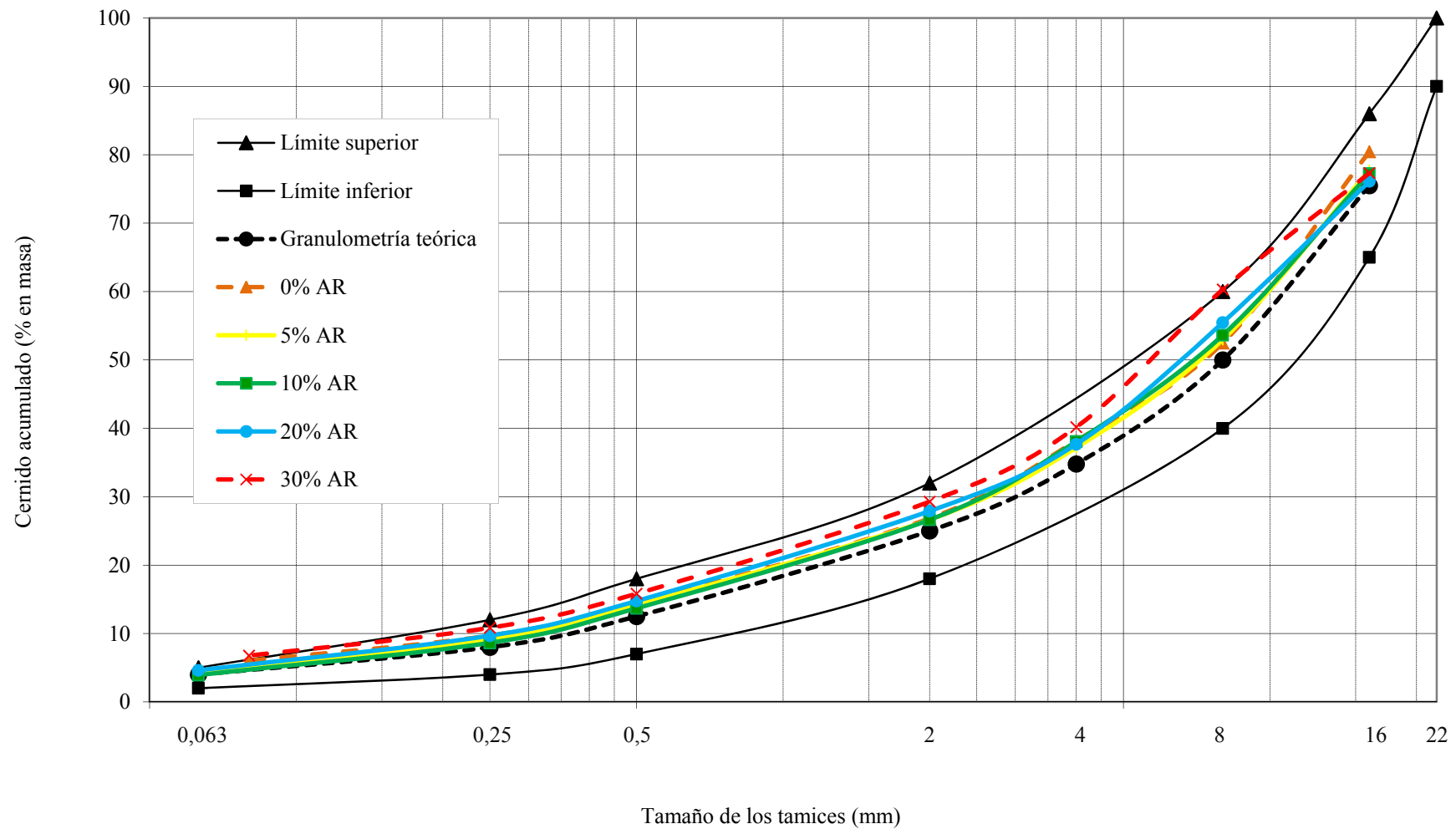


Figura 7.4.- Granulometría de las mezclas bituminosas fabricadas con AR tras mezclar y compactar. Obtenida a partir de los áridos recuperados.

7.2.5 Designación de las probetas

Con el fin de facilitar el análisis de los resultados tanto de los ensayos Marshall como de los ensayos de tracción indirecta tras inmersión, a cada uno de los grupos de probetas estudiados se les ha aplicado la siguiente designación:

- En primer lugar dos caracteres numéricos, que indican el porcentaje de AR sobre la masa total del árido, incluido el polvo mineral: “00” (0% de AR), “05” (5% de AR), “10” (10% de AR), “20” (20% de AR) y “30” (30 % de AR).
- Después una letra que indica el tipo de polvo mineral, “N” si es natural (procedente de la corneana) y “C” si es cemento portland compuesto CEM II/B-M (V-L) 32,5 N (cemento gris).
- Finalmente, tras un guión, se indica el tipo de pretratamiento aplicado: “0H” indica que no se ha aplicado pretratamiento; “1H” indica que la mezcla se ha dejado una hora en estufa a 170°C antes de su compactación; “2H” que se ha dejado dos horas, “3H” tres horas y “4H” cuatro horas. “EM” indica que se ha llevado a cabo la preenvuelta del AR con un 5% de emulsión bituminosa ECL-2d.

Así, por ejemplo, la 20C-4H, sería una probeta con un 20% de AR, polvo mineral de cemento y un pretratamiento de 4 horas en estufa a 170°C; una 05C-EM, sería una probeta con un 5% de AR, polvo mineral de cemento y con el AR preenvuelto con ECL-2d.

7.3 COMPARACIÓN DE LOS PRETRATAMIENTOS

7.3.1 Parámetros analizados

En esta primera fase se analiza la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con AR a las que se les han aplicado los dos pretratamientos seleccionados en el capítulo anterior, como consecuencia de la realización del estudio de la afinidad entre el árido y el ligante. Como ya se ha comentado, un primer pretratamiento consiste en dejar reposar la mezcla suelta en estufa durante 4 horas a 170°C antes de proceder a su compactación. Un segundo pretratamiento consiste en someter al AR a una preenvuelta con emulsión bituminosa ECL-2d en un porcentaje del 5% sobre su masa total. El fin último de este análisis es el de determinar la eficacia de estos dos pretratamientos sobre la

sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con AR y compararlos entre sí.

Para poder generalizar las conclusiones se ha realizado el ensayo de tracción indirecta tras inmersión sobre probetas fabricadas con diversos contenidos de ligante siguiendo la norma UNE-EN 12697-12 (AENOR, 2006c). Posteriormente, ya en la segunda fase, el análisis de la sensibilidad al agua se completará realizando el ensayo de tracción indirecta a probetas fabricadas con el contenido óptimo de ligante.

Martínez (2000) indica que el ensayo de tracción indirecta es un ensayo estático que reproduce el estado tensional en la fibra inferior de la capa bituminosa (zona de tracción). Aunque, puesto que este ensayo es estático, al igual que el ensayo Marshall, no reproduce las condiciones reales de aplicación de las cargas (Tino et al., 2008).

Consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de mezcla bituminosa compactadas mediante 50 golpes por cara con la maza Marshall (figuras 7.5 y 7.6), que se dividen en dos subconjuntos del mismo número de probetas. Un subconjunto, denominado grupo seco, se mantiene seco a la temperatura ambiente, mientras que el otro, denominado grupo húmedo, se satura y se introduce en un baño de agua a 40°C durante 3 días (figura 7.7). Tras acondicionar ambos grupos a la temperatura de ensayo de 15°C durante un mínimo de 2 horas, se procede a su rotura a tracción indirecta (figura 7.8).

El primer parámetro que se mide en este ensayo es la carga de rotura de la probeta a tracción indirecta, indicativo de la resistencia a tracción indirecta de las mezclas. La resistencia a tracción indirecta se obtuvo aplicando la norma UNE-EN 12697-23 (AENOR, 2004c), según la siguiente expresión:

$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot H \cdot d} \quad (7.1)$$

donde:

- ITS = resistencia a tracción indirecta de la probeta (MPa).
- P = carga de rotura (N), según se representa en la figura 7.9.
- H = altura de la probeta (mm).
- d = diámetro de la probeta o testigo (mm).



Figura 7.5.- Introducción de la mezcla bituminosa en el molde Marshall.



Figura 7.6.- Compactación con maza Marshall.



Figura 7.7.- Probetas Marshall en el baño de agua.

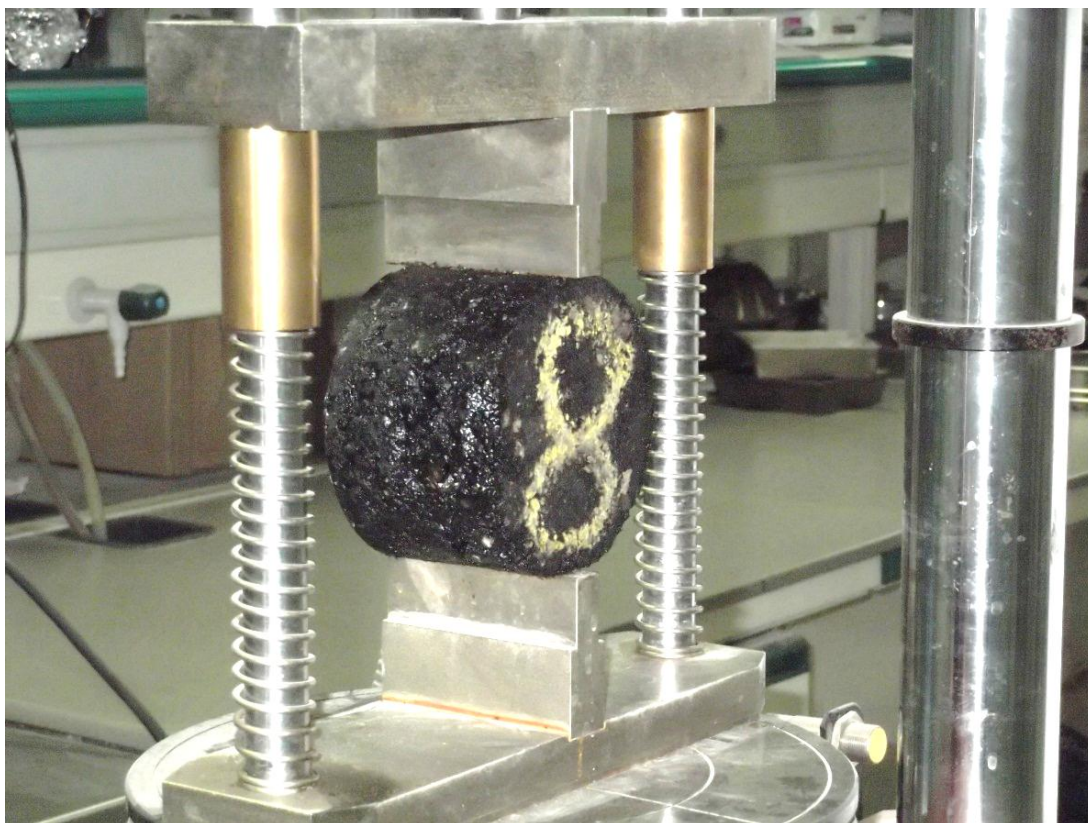


Figura 7.8.- Rotura de las probetas a tracción indirecta.

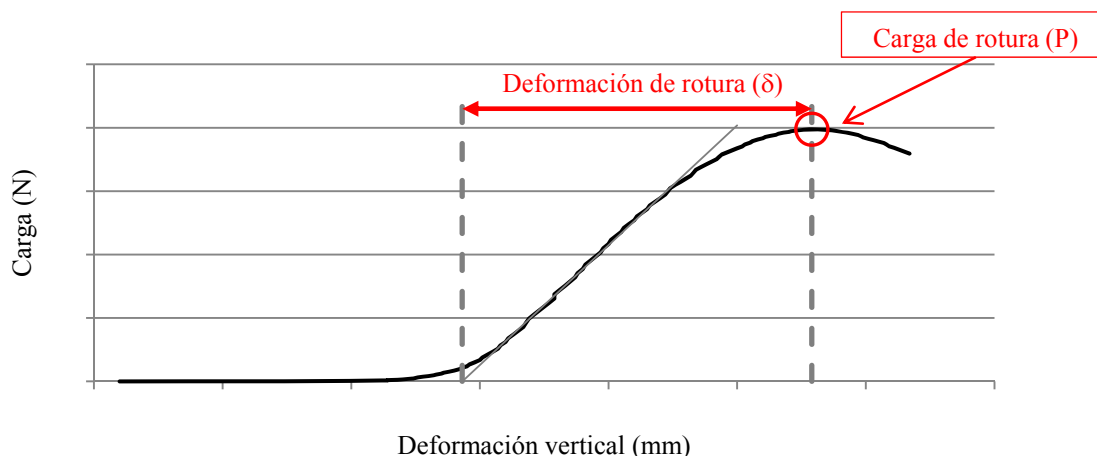


Figura 7.9.- Carga frente a deformación vertical en el ensayo de tracción indirecta.

A continuación se determina la razón entre la resistencia media a tracción indirecta del grupo húmedo y la del grupo seco (ITSR), expresada como porcentaje. Esta razón ofrece información sobre la resistencia a la acción del agua de las probetas. Se calcula tal y como se indica en la ecuación 7.2 (AENOR, 2006c):

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 \quad (7.2)$$

donde:

ITS_w = resistencia a tracción indirecta de las probetas del grupo húmedo, expresado en MPa. Es la media de la resistencia a tracción indirecta obtenida para cada una de las probetas del grupo húmedo.

ITS_d = resistencia a tracción indirecta de las probetas del grupo seco, expresado en MPa. Es la media de la resistencia a tracción indirecta obtenida para cada una de las probetas del grupo seco.

Además, pueden medirse otros parámetros como el desplazamiento vertical o la deformación horizontal, ya que pueden dar una idea sobre la fragilidad de la mezcla (Centeno Ortiz, 2006). En general, durante el ensayo de tracción indirecta, se mide la deformación horizontal. No obstante, si no se cuenta con los dispositivos de medición adecuados, la adquisición de este dato puede resultar complicada. No ocurre lo mismo con la deformación vertical, ya que se puede obtener a partir del desplazamiento que sufre el pistón de carga durante la realización del ensayo, hasta alcanzar la rotura de la probeta (Centeno Ortiz, 2006). Dado que este desplazamiento vertical se registra por defecto

durante el ensayo, no es preciso colocar extensómetros para medirlo. Por tanto, en la presente tesis se va a proceder a analizar la deformación de rotura obtenida a partir del desplazamiento vertical del pistón de la siguiente forma:

$$\delta = \frac{\Delta L}{d} \times 100 = \frac{L_1 - L_2}{d} \times 100 \quad (7.3)$$

donde:

- δ = deformación de rotura (%), según se ilustra en la figura 7.9.
- ΔL = $L_1 - L_2$ = desplazamiento del pistón en mm desde que se inicia la carga (L_1) hasta la rotura (L_2).
- d = diámetro de la probeta o testigo en mm.

También se han analizado los huecos en mezcla (V_m) y los huecos en el árido mineral. Este último valor varía según se considere o no en su determinación el ligante absorbido por el árido. Por ello, este parámetro se ha calculado de dos formas: en una se ha considerado en los cálculos la absorción de ligante (VMA_{abs}) y en la otra este hecho no se ha tenido en cuenta (VMA). Tanto los huecos en mezcla como los huecos en el árido mineral se expresan como porcentaje sobre el volumen total de la mezcla compactada. En el Anexo 2 se describe con detalle su determinación (V_m , VMA y VMA_{abs}).

Como se ha indicado anteriormente, la mezcla bituminosa ensayada es una AC 22 base G. Es decir, es una mezcla diseñada para ser dispuesta en la capa de base. Puede verse en la tabla 7.1, que el PG-3 establece para qué valores de V_m y VMA una mezcla bituminosa para capa de base se puede considerar apta para una determinada categoría de tráfico pesado. Para verificar el cumplimiento de las especificaciones, se ha considerado adecuado analizar el valor de VMA y no el de VMA_{abs} pues los límites indicados en el PG-3 también están establecidos sin considerar la absorción de ligante. En el apartado 7.4 se justifica con mayor detalle esta decisión.

Característica	T00 y T0	T1 y T2	T3 y arcenes	T4
V_m (%)	5-8	6-9	5-9	-
VMA (%)	Podrá exigirse un valor $\geq 14\%$			

Tabla 7.1.- Valores del contenido de huecos exigidos por el PG-3 para una mezcla bituminosa en caliente AC 22 base G. Fuente: Ministerio de Fomento (2008).

7.3.2 Sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con AR pretratado

Se han ensayado un total de 33 series con un mínimo de 6 probetas cada una (3 para el grupo seco y 3 para el grupo húmedo) y otras 2 para determinar la densidad máxima y la densidad aparente (284 probetas en total), que se describen en la tabla 7.2 adjunta.

Serie		Pb s/mezcla	% de AR (*)	Serie		Pb s/mezcla	% de AR (*)
Reposo de 4 horas en estufa	05C-4H	-	5	Preenvuelta con ECL-2d	05C-EM	3,0%	5
		-				3,5%	
		4,0%				4,0%	
		4,5%				4,5%	
		5,0%				-	
	10C-4H	-	10		10C-EM	3,0%	10
		-				3,5%	
		4,0%				4,0%	
		4,5%				4,5%	
		5,0%				-	
	20C-4H	3,5%	20		20C-EM	3,5%	20
		4,0%				4,0%	
		4,5%				4,5%	
		5,0%				5,0%	
		5,5%				-	
	30C-4H	-	30		30C-EM	3,0%	30
		3,5%				3,5%	
		4,0%				4,0%	
		4,5%				4,5%	
		5,0%				5,0%	
		5,5%				-	

(*) Sobre el total del árido en masa, incluyendo el polvo mineral.

Tabla 7.2.- Series de probetas fabricadas para el ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Mezclas con pretratamiento.

En los ensayos realizados de tracción indirecta tras inmersión en agua es importante destacar lo siguiente:

- En un total de 16 series se ha dejado la mezcla reposar en estufa durante 4 horas a 170°C antes de su compactación para favorecer la absorción de ligante por parte del AR, con el fin de que esto mejore la sensibilidad al agua de la mezcla.
- En un total de 17 series se ha sometido al AR a una preenvuelta con emulsión bituminosa de rotura lenta, ECL-2d, en un 5% en masa sobre el total del AR utilizado. Se ha esperado en todos los casos a que se produjese la rotura de la emulsión (figura 7.10) antes de proceder al calentamiento de los áridos. Esto supuso un mínimo de 24 horas transcurridas entre la envuelta del AR con emulsión

y la fabricación de la mezcla. Igual que en el caso del reposo en estufa, el fin último de este pretratamiento es mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con AR procedente de RCD.

- En las 33 series, tanto las que se han dejado reposar 4 horas en estufa como en las que se ha preenvuelto el AR con emulsión ECL-2d, se han ensayado diferentes contenidos de ligante para cada uno de los porcentajes de sustitución de árido natural por AR considerados. Así se puede estudiar tanto la influencia de la cantidad de betún empleada como del contenido de AR en la sensibilidad al agua.
- Para los porcentajes más altos de AR (20% y 30%) se han ensayado contenidos de ligante más altos que para los porcentajes más bajos (5% y 10%) ya que se supuso que a mayor cantidad de AR mayor será la absorción de ligante y, por tanto, mayores cantidades de ligante demandará la mezcla (tabla 7.2).
- Se han ensayado porcentajes de ligante más altos para el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa que para el de preenvuelta con ECL-2d, ya que se supuso que el primero absorbería más ligante que el segundo (tabla 7.2).



Figura 7.10.- Detalle del AR preenvuelto con ECL-2d cuando ya se ha producido la rotura de la emulsión.

En las tablas 7.3 y 7.4 se recogen los valores obtenidos para los parámetros anteriormente comentados, además de la designación de la serie ensayada y el contenido de ligante (Pb). Tal y como se ha indicado anteriormente, el ensayo de tracción indirecta tras inmersión se utiliza fundamentalmente para medir la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas. En este sentido, el PG-3 indica que para capas de base e intermedia la relación de resistencia a la tracción indirecta o resistencia conservada deberá ser mayor o igual que el 80%. Como puede verse en las tablas 7.3 y 7.4 la mayor parte de las probetas ensayadas superan el límite del 80%, por lo que son aptas para su utilización en capas de base.

Sin embargo, se tienen algunas excepciones. En el caso del pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa las mezclas con un 20% y un 30% de AR, no superan el valor exigido para el ITSR para los contenidos más bajos de ligante, es decir, el 3,5% y el 4,0%. Tampoco la mezcla con un 30% de AR y un 5% de ligante cumple esta especificación. Este último caso contrasta con el hecho de que sí se cumple la especificación con un 30% de AR y un 4,5% de ligante y un 5,5% de ligante. Por ello, el resultado de la mezcla fabricada con un 30% de AR y un 5% de ligante podría deberse a las dispersiones propias de este tipo de ensayo. En el caso del pretratamiento consistente en la preenvuelta del AR con ECL-2d, no alcanzan una resistencia conservada del 80% la mezcla con un 20% de AR fabricada con un 3,5% de ligante y la mezcla con un 30% de AR fabricada con un 3,0% de betún. Tampoco la mezcla con un 5% de AR y un 3% de betún alcanza el 80% de la resistencia conservada.

A la vista de los resultados obtenidos para ambos pretratamientos puede concluirse que, para garantizar una adecuada resistencia a la acción del agua, **será necesario utilizar una mayor cantidad de betún en el caso del pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa que en el caso del pretratamiento de preenvuelta con ECL-2d**. Como se ha visto, esto es especialmente evidente para los porcentajes de AR más elevados (20% y 30%). Aunque es preciso matizar que en el caso del pretratamiento de preenvuelta con ECL-2d, las mezclas, además de betún, llevan emulsión. La emulsión ECL-2d presenta un contenido de betún del 61,2% y se utiliza un 5% de emulsión sobre el peso del AR. Por tanto, puesto que el peso del AR varía entre 0 g (0% de AR) y 345,3 g (30% de AR), la emulsión introduce en la mezcla entre 0 g (0% de AR) y 10,6 g (30% de AR) de betún adicional por probeta. Es decir, el pretratamiento con emulsión introduce en la mezcla entre un 0% (0% de AR) y un 0,9% (30% de AR) de betún adicional. Por tanto, aunque a priori parece que las mezclas

Serie		Pb (%) s/mezcla	ITSR (%)	ITSd (MPa)	ITSw (MPa)	δd (%)	δw (%)	VMA (%)	VMA _{abs} (%)	Vm (%)	Categoría de tráfico pesado (*)
Reposo de 4 horas en estufa	05C-4H	4,0	87,19	2,333	2,034	1,598	1,632	17,48	15,36	8,01	T1 a T4
		4,5	94,57	1,854	1,753	1,587	1,655	16,86	14,81	6,09	T00 a T4
		5,0	84,98	2,190	1,860	1,545	1,601	17,84	15,65	5,92	T00, T0, T3, T4
	10C-4H	4,0	85,05	1,625	1,382	1,411	1,424	17,42	14,92	7,98	T00 a T4
		4,5	88,09	2,591	2,282	1,474	1,745	20,51	18,09	10,23	T4
		5,0	83,26	2,158	1,797	1,402	1,664	17,19	14,65	5,23	T00, T0, T3, T4
	20C-4H	3,5	65,47	2,198	1,439	1,064	1,145	17,62	14,68	9,52	T4
		4,0	67,72	2,374	1,608	1,298	1,372	13,46	13,43	4,02	T4
		4,5	99,93	1,888	1,887	1,453	1,736	17,26	14,16	6,68	T00 a T4
		5,0	89,49	1,950	1,745	1,609	1,721	17,97	15,04	6,27	T00 a T4
		5,5	96,93	2,616	2,536	1,595	1,568	16,65	13,59	3,49	T4
	30C-4H	3,5	76,65	1,870	1,433	1,175	1,158	18,38	14,53	10,39	T4
		4,0	79,75	1,842	1,469	1,334	1,511	14,38	13,43	5,09	T00, T0, T3, T4
		4,5	91,46	1,913	1,749	1,347	1,721	17,63	14,20	7,22	T00 a T4
		5,0	76,56	2,574	1,971	1,729	2,006	18,70	15,05	7,19	T00 a T4
		5,5	95,78	2,329	2,231	1,440	1,772	17,18	13,39	4,20	T4

(*) Según los valores de VMA y Vm especificados en el PG-3.

Tabla 7.3.- Resultados del ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Reposo de 4 horas en estufa

Serie		Pb (%) s/mezcla	ITSR (%)	ITSd (MPa)	ITSw (MPa)	δd (%)	δw (%)	VMA (%)	VMA _{abs} (%)	Vm (%)	Categoría de tráfico pesado (*)
Preenvuelta con ECL-2d	05C-EM	3,0	72,21	1,103	0,797	1,496	1,624	16,01	13,99	8,87	T1 a T4
		3,5	86,50	1,438	1,243	1,700	1,865	15,18	13,28	6,74	T00 a T4
		4,0	82,10	1,436	1,179	1,623	2,215	15,85	13,55	6,18	T00 a T4
		4,5	96,86	1,601	1,550	1,986	1,852	14,63	12,69	3,59	T4
	10C-EM	3,0	82,66	1,155	0,954	1,531	1,710	14,95	12,83	7,78	T00 a T4
		3,5	84,95	1,342	1,140	1,773	1,710	14,52	12,48	6,08	T00 a T4
		4,0	86,82	1,734	1,505	1,576	1,898	14,55	12,50	4,85	T4
		4,5	87,93	1,705	1,499	1,828	2,014	14,19	12,04	3,16	T4
	20C-EM	3,5	72,63	1,651	1,199	1,711	1,874	14,61	12,53	6,32	T00 a T4
		4,0	89,12	1,657	1,477	1,676	1,885	14,58	13,33	5,00	T00, T0, T3, T4
		4,5	95,76	1,402	1,343	1,799	1,833	15,84	12,58	6,39	T00 a T4
		5,0	89,39	1,680	1,501	1,805	1,956	16,34	12,35	5,57	T00, T0, T3, T4
	30C-EM	3,0	73,16	1,036	0,758	1,499	1,633	14,84	13,13	2,77	T4
		3,5	88,57	1,437	1,273	1,720	1,789	16,19	13,24	9,28	T4
		4,0	86,32	1,475	1,273	1,822	1,790	16,03	12,20	7,93	T00 a T4
		4,5	88,36	1,525	1,347	1,651	1,809	14,65	12,38	5,24	T00, T0, T3, T4
		5,0	97,41	1,718	1,674	1,798	1,871	14,90	12,05	4,28	T4

(*) Según los valores de VMA y Vm especificados en el PG-3.

Tabla 7.4.- Resultados del ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Preenvuelta del AR con ECL-2d.

que se dejan reposar 4 horas en estufa consumen más betún, esto no es así. El **betún introducido como consecuencia de la preenvuelta del AR con ECL-2d también debe ser tenido en cuenta.**

En las tablas 7.3 y 7.4 también se incluyen los valores de ITSd, ITSw, δs , δw , Vm, VMA y VMA_{abs}. Para facilitar la interpretación de estos parámetros y poder comparar los resultados obtenidos para ambos pretratamientos, se han realizado varios gráficos, que se comentan en los próximos apartados.

Además, en las tablas 7.3 y 7.4 también se incluye una columna denominada “Categoría de tráfico pesado” en la que se indica para qué categorías de tráfico pesado sería apta la mezcla bituminosa ensayada, según el PG-3 (tabla 7.1), teniendo en cuenta exclusivamente los valores de Vm y VMA obtenidos. Como puede verse, en general, para las mezclas fabricadas con **ambos pretratamientos** se alcanzan **categorías de tráfico pesado elevadas**, con la salvedad de algunas excepciones en las que los huecos en mezcla son excesivamente altos o excesivamente bajos. Así por ejemplo la mezcla fabricada con un 30% de AR y un 5,5% de betún, sometida al pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, presenta un contenido de huecos en mezcla excesivamente bajo, por lo que solo es apta para la categoría de tráfico pesado más baja, es decir, la T4. También a modo de ejemplo, la mezcla fabricada con un 30% de AR preenvuelto con ECL-2d y un 3,5% de ligante presenta un porcentaje de huecos de aire excesivo, por lo que solo es apta para una T4.

7.3.2.1 Análisis de la resistencia conservada

En la figura 7.11 se representa la resistencia conservada a tracción indirecta (ITSR) en función del contenido de ligante, para los dos pretratamientos analizados. De la figura 7.11 puede deducirse lo siguiente:

- **Ambos pretratamientos**, la preenvuelta con emulsión y el reposo de 4 horas en estufa, son **muy efectivos a la hora de mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con AR**. En este sentido, como se ha comentado anteriormente, para la mayor parte de los contenidos de ligante ensayados se supera el 80% de resistencia conservada exigido por el PG-3 para capas de base.
- Sin embargo, cabe destacar que en las mezclas fabricadas con 4 horas de reposo en

estufa, el cumplimiento de los requisitos del PG-3, se da para contenidos más altos de ligante que en el caso de las mezclas fabricadas con AR preenvuelto con ECL-2d. Como se ha comentado anteriormente, esto es debido a que en las mezclas con AR preenvuelto con ECL-2d ya se introduce una parte de ligante al realizar la preenvuelta con la emulsión.

- El ITSR alcanzado para un mismo contenido de ligante en ambos pretratamientos, a veces es mayor para las mezclas que se han dejado reposar 4 horas en estufa; mientras que en otras ocasiones es mayor para las mezclas en las que se ha preenvuelto el AR con emulsión. En otros casos presenta valores muy similares para las probetas fabricadas con ambos pretratamientos. Por ello, **no se puede decir que un pretratamiento sea más efectivo que el otro a la hora de mejorar la sensibilidad al agua.**
- La figura 7.11 no muestra tendencias claras del valor de ITSR con el contenido de ligante, sin embargo sí parece haber una serie de puntos discordantes. Dos claros ejemplos de estas discordancias en el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa se dan con el 5% de betún para el 20% y el 30% de AR (figuras 7.11c y 7.11d). Esto es debido, seguramente, a la heterogeneidad del material a ensayar introducida por la utilización del AR y a las dispersiones propias del ensayo.

En la figura 7.12 se representa la resistencia conservada a tracción indirecta para ambos pretratamientos en función del porcentaje de AR. Se han representado las resistencias correspondientes al 4,0% y al 4,5% de ligante, ya que son los contenidos de ligante ensayados en común para los dos pretratamientos en los cuatro porcentajes de AR. Puede verse que el porcentaje de AR apenas influye en el valor de ITSR. También puede apreciarse como el **contenido más elevado de betún (4,5%) alcanza mayores valores del ITSR** que el menor contenido (4,0%).

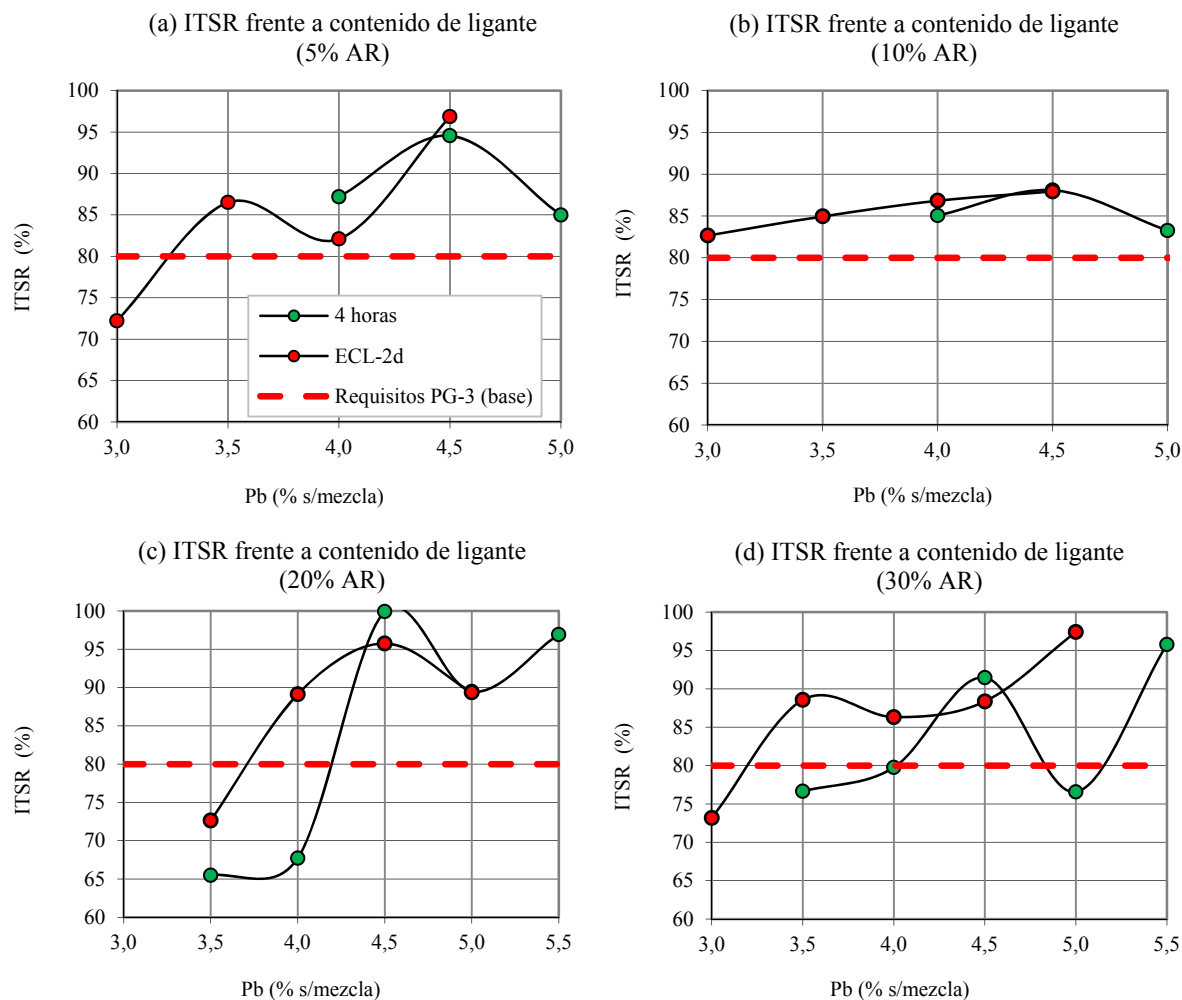


Figura 7.11.- Resistencia conservada a tracción indirecta para el pretratamiento consistente en dejar 4 horas de reposo en estufa y el pretratamiento consistente en realizar una preenvuelta del AR con ECL-2d: (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.

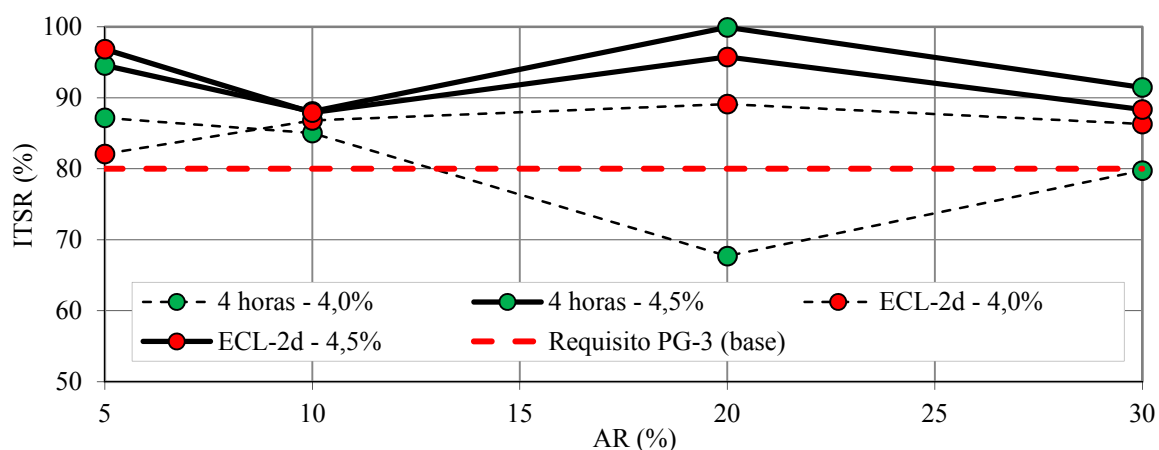


Figura 7.12.- Resistencia conservada a tracción indirecta para el pretratamiento consistente en dejar 4 horas de reposo en estufa y el pretratamiento consistente en realizar una preenvuelta del AR con ECL-2d en función del porcentaje de AR.

7.3.2.2 Análisis de la resistencia a tracción indirecta y la deformación de rotura

En la figura 7.13 se representan la resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo frente al porcentaje de ligante para el pretratamiento de **4 horas de reposo en estufa**. Como era de esperar, la tendencia general es que la resistencia a tracción indirecta en seco es mayor o igual que la resistencia en húmedo. Además, en general, las resistencias en seco y en húmedo presentan tendencias similares. Esto es: si la resistencia en seco crece con el contenido de ligante lo mismo ocurre con la resistencia en húmedo y viceversa.

En el ensayo de tracción indirecta tras inmersión la resistencia a tracción indirecta aumenta hasta llegar a un contenido de ligante a partir del cual disminuye. Sin embargo, no se aprecia en la figura 7.13 esta tendencia. Únicamente cabe señalar que en las curvas en las que se han ensayado más contenidos de ligante (las correspondientes al 20% y 30% de AR) existe un cierto patrón de comportamiento: el valor de la resistencia a tracción indirecta aumenta a medida que aumenta el contenido de ligante. Parece claro que al haberse obtenido las curvas correspondientes a estos dos porcentajes de AR con un mayor número de puntos, están mejor definidas que las correspondientes al 5% y al 10% de AR, habiéndose obtenido las ramas crecientes de las curvas.

Lo que sí puede apreciarse en la figura 7.13 es que, en general, la diferencia entre las resistencias en seco y en húmedo es más acusada cuánto mayor es el porcentaje de AR. Esto es especialmente apreciable en la figura correspondiente al 30% de AR (figura 7.13d). Se pone así de manifiesto la influencia del porcentaje de AR en la sensibilidad al agua: la tendencia es que a mayor porcentaje de AR mayor es la pérdida de resistencia en húmedo respecto a la resistencia en seco. De todas formas, dadas las heterogeneidades propias del AR analizado hay excepciones que se escapan de la tendencia general.

En la figura 7.14 se representan las resistencias a tracción indirecta, tanto en seco como en húmedo, en función del porcentaje de AR, para el pretratamiento consistente en dejar la mezcla reposar 4 horas en la estufa antes de compactar. Se han representado los resultados obtenidos para los tres contenidos de ligante ensayados en común (4,0%, 4,5% y 5,0%) para los cuatro porcentajes de AR ensayados (5%, 10%, 20% y 30%). No se aprecia en esta figura una tendencia clara de las resistencias en seco y en húmedo con el contenido de AR: para un mismo contenido de ligante las resistencias no parecen depender del contenido de AR de la mezcla. Sí se observa que ITS_d es superior a ITS_w.

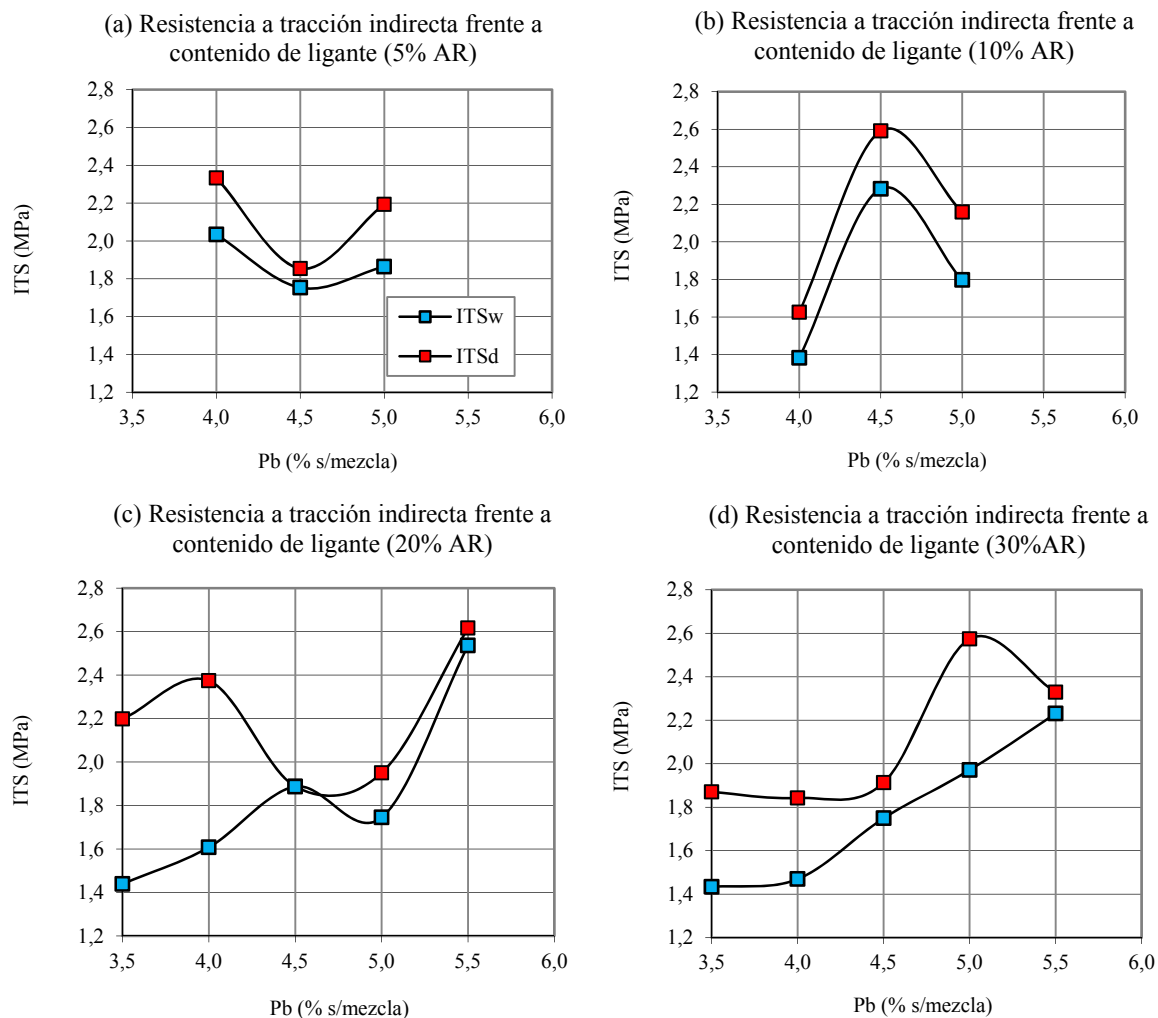


Figura 7.13.- Resistencia a tracción indirecta en seco y húmedo frente a contenido de ligante para el pretratamiento consistente en 4 horas de reposo en estufa: (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.

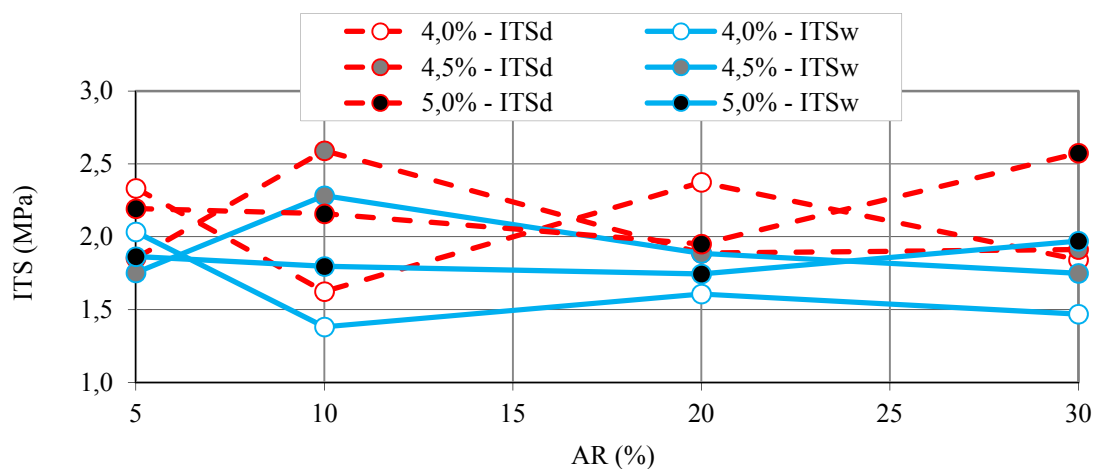


Figura 7.14.- Resistencia a tracción indirecta en seco y húmedo frente al contenido de AR para el pretratamiento consistente en 4 horas de reposo en estufa.

En la figura 7.15 se puede ver la resistencia a tracción indirecta en seco y húmedo frente a porcentaje de ligante para el pretratamiento consistente en la preenvuelta del AR con ECL-2d:

- Al igual que en la figura 7.13 la resistencia en seco es superior a la resistencia en húmedo. Además ambas resistencias (en seco y en húmedo) también siguen tendencias similares, es decir, si la resistencia en seco crece con el contenido de ligante lo mismo hace la resistencia en húmedo y viceversa.
- En general, se aprecia una tendencia creciente de las resistencias a tracción indirecta con el contenido de ligante (rama creciente de la curva). En este sentido, si se compara la figura 7.15 con la 7.13 puede verse que las curvas obtenidas con la preenvuelta de ECL-2d (figura 7.15) son más tendidas que las obtenidas con el pretratamiento de 4 horas en estufa (figura 7.13). Por tanto, la resistencia a tracción indirecta depende más del contenido de ligante en el caso del reposo de 4 horas en estufa; mientras que en el caso de la preenvuelta con ECL-2d las resistencias no se ven tan influenciadas por el contenido de ligante. Por tanto, la absorción de betún parece ser un aspecto clave en el valor de la resistencia a tracción indirecta.
- También puede verse que, en general, las **resistencias** obtenidas para el pretratamiento de **4 horas en estufa** (figura 7.13) son **superiores a las obtenidas con la preenvuelta del AR con ECL-2d** (figura 7.15). Además escogiendo adecuadamente el contenido de ligante, es posible llegar a resistencias tanto en seco como en húmedo sustancialmente mayores en el caso de las mezclas que se han dejado 4 horas reposando en estufa. Esto se debe fundamentalmente a la absorción de betún por los poros del AR, en particular, por la absorción de betún por parte del mortero de cemento adherido. Así, por un lado, la absorción de betún en los poros, da lugar a áridos más resistentes, pues el mortero se fortalece al reducirse su porosidad. Estos áridos más resistentes, a la vez, producen mezclas más resistentes frente a la tracción indirecta. Por otro lado, la absorción de betún en las mezclas fabricadas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa da lugar a un menor contenido de ligante efectivo que en las mezclas fabricadas con AR preenvuelto con ECL-2d, lo que se traduce en áridos con mayor rozamiento; lo cual también podría favorecer la resistencia a tracción indirecta.

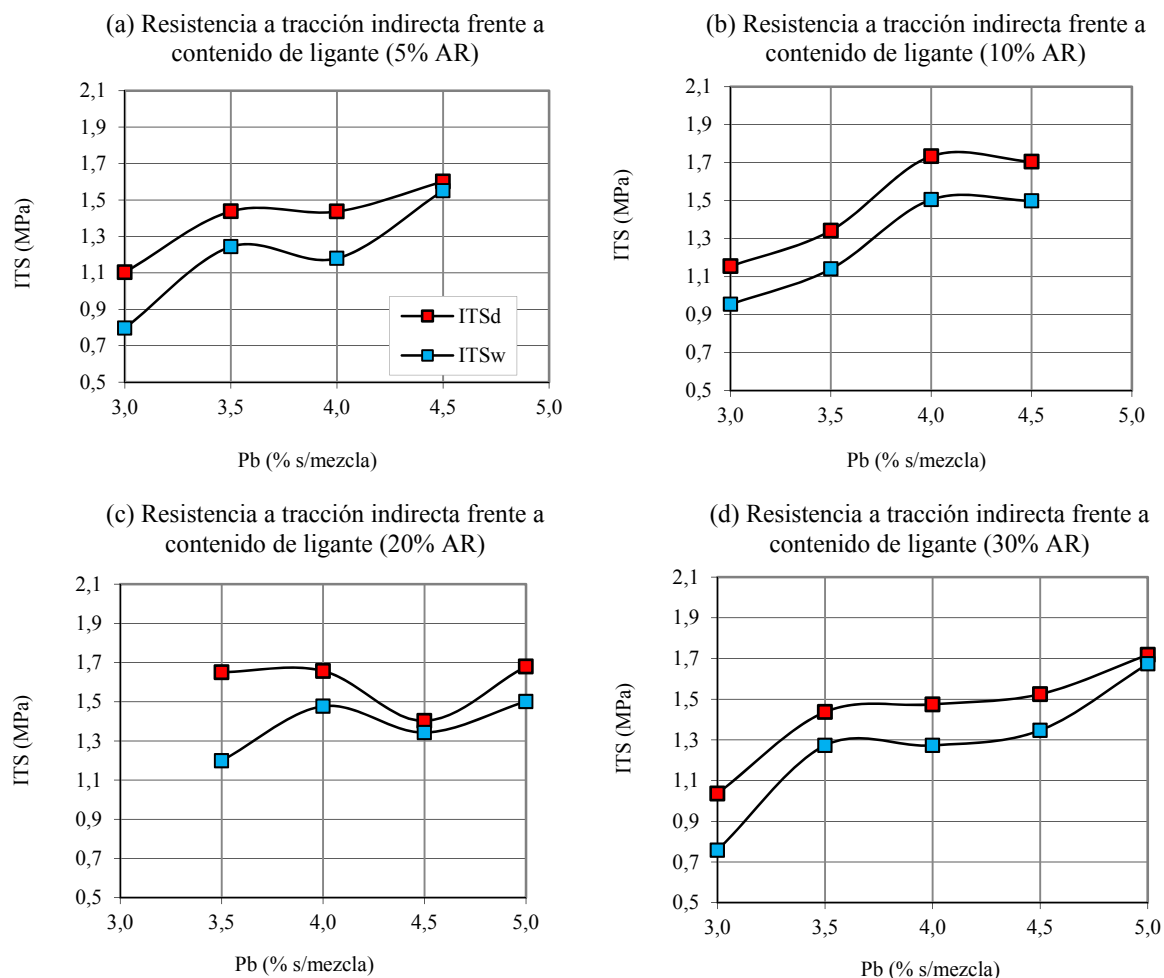


Figura 7.15.- Resistencia a tracción indirecta en seco y húmedo frente a contenido de ligante para el pretratamiento consistente en realizar una preenvuelta del AR con ECL-2d: (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.

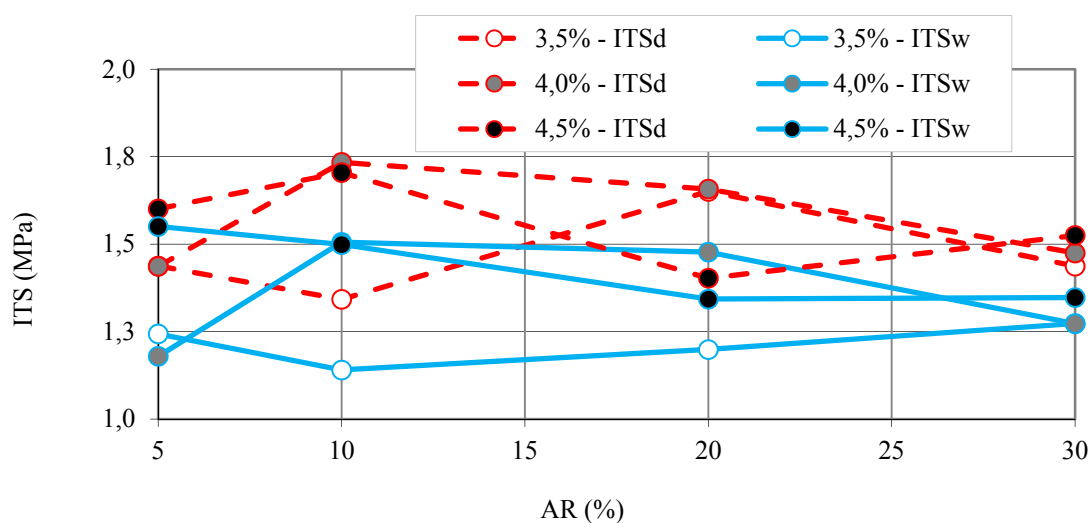


Figura 7.16.- Resistencia a tracción indirecta en seco y húmedo frente al contenido de AR para el pretratamiento consistente en la preenvuelta del AR con ECL-2d.

En la figura 7.16 se representan, para el pretratamiento de preenvuelta del AR con ECL-2d, las resistencias a tracción indirecta, tanto en seco como en húmedo, en función del porcentaje de AR. Se han dibujado las curvas para los tres contenidos de ligante ensayados en común (3,5%, 4,0% y 4,5%). Al igual que en la figura 7.15, se aprecia que las resistencias en seco son superiores a las resistencias en húmedo y parece que el contenido de AR no tiene apenas influencia en el valor de la resistencia. En este caso no se observa una mayor diferencia entre las resistencias en seco y en húmedo a medida que aumenta el contenido de AR. Además, si se compara la figura 7.16 con la figura 7.14 puede verse, como ya se ha comentado anteriormente, que los valores de las resistencias, tanto en seco como en húmedo, son inferiores para las mezclas con pretratamiento de preenvuelta del AR con ECL-2d que para las fabricadas con 4 horas de reposo en estufa.

En la figura 7.17 se representa la **deformación de rotura** en función del contenido de ligante y del porcentaje de AR (5%, 10%, 20% y 30%). Se incluyen los resultados para ambos pretratamientos, tanto los obtenidos para las probetas del grupo seco como los obtenidos para las probetas del grupo húmedo. Como puede observarse, en general las deformaciones de rotura se encuentran muy acotadas, oscilando, salvo contadas excepciones, entre un 1% y un 2%. Dentro de este rango, los **mayores valores** corresponden a las mezclas fabricadas tras la aplicación del pretratamiento de **preenvuelta con emulsión**. Es decir, el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa reduce la deformación de rotura. Esto es así, debido a que al aplicar este pretratamiento, la absorción de betún por parte de los poros del AR, provoca que haya una menor cantidad de ligante efectivo que en el caso de las mezclas fabricadas con AR preenvuelto con emulsión. Además, en las mezclas con AR preenvuelto con ECL-2d hay que considerar el betún adicional que aporta la emulsión. Por tanto, al haber menos ligante efectivo en las mezclas fabricadas con 4 horas de reposo en estufa, también las deformaciones son menores. Además, en la figura 7.17 puede verse como las **deformaciones** para las probetas del **grupo húmedo** son, en general, **algo mayores que las del grupo seco**. Esto puede deberse a que el acondicionamiento sufrido por las probetas del grupo húmedo altera las propiedades del ligante. También puede tener influencia en este resultado el efecto lubricante que ejerce el agua sobre el árido, ya que podría reducir su rozamiento interno.

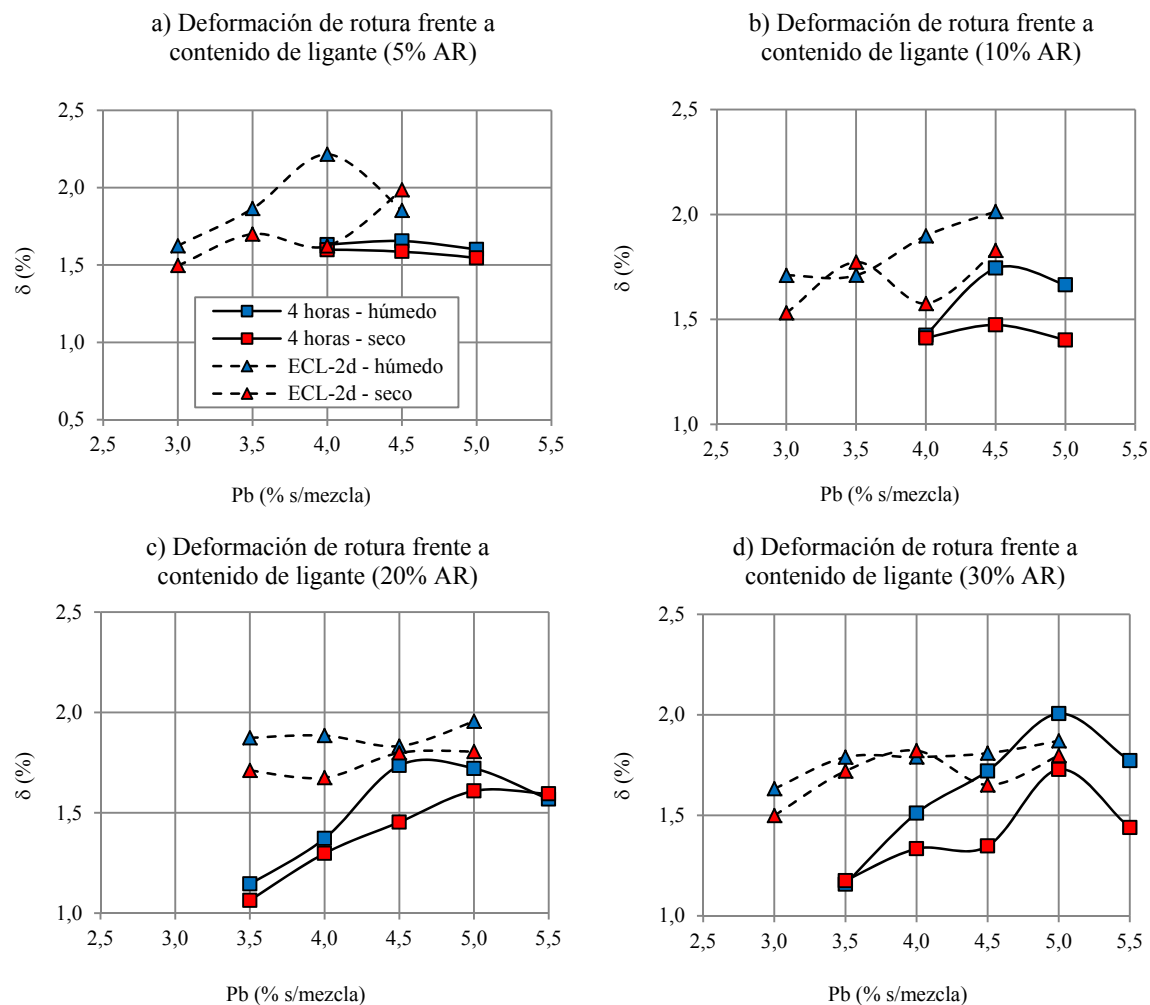


Figura 7.17.- Deformación de rotura frente a contenido de ligante para ambos pretratamientos (4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d): (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.

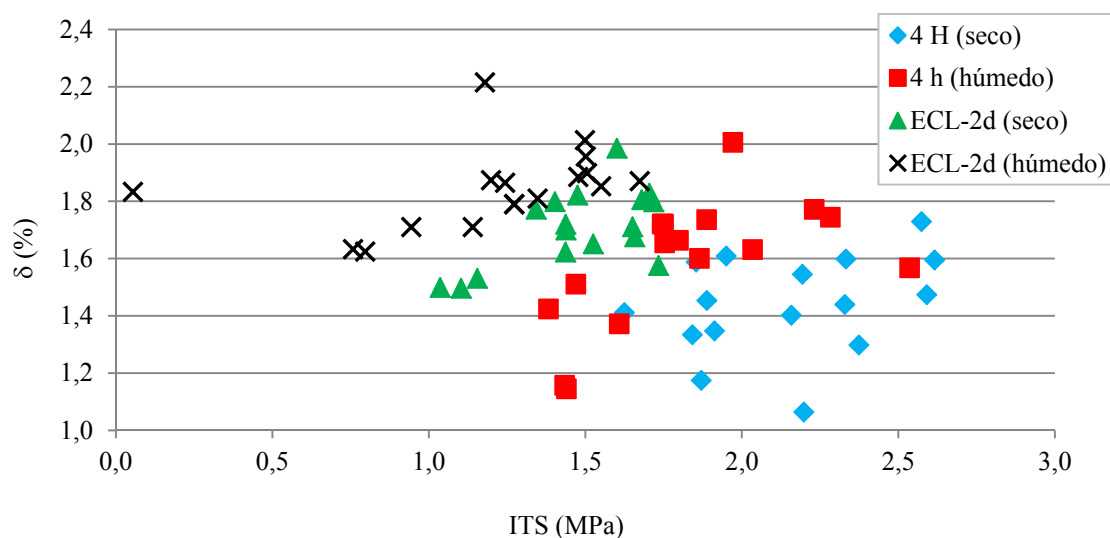


Figura 7.18.- Deformación vertical de rotura frente a resistencia a tracción indirecta para las mezclas fabricadas con ambos pretratamientos (reposo de 4 horas en estufa y preenvuelta con ECL-2d).

Resulta de interés para evaluar el comportamiento de las mezclas bituminosas, representar la deformación vertical de rotura frente a la resistencia a tracción indirecta. En la figura 7.18 se han representado estos dos parámetros para las mezclas fabricadas con ambos pretratamientos, tanto en seco como en húmedo. A la vista de la figura 7.18 puede verse claramente como las mezclas fabricadas con el pretratamiento de **4 horas de reposo** en estufa presentan unas **mayores resistencias a tracción indirecta** tanto en seco como en húmedo. A priori, que este tipo de mezclas presenten unas resistencias a tracción indirecta más elevadas, es indicativo de un mejor comportamiento mecánico: serán **más rígidas y resistentes**. Sin embargo, las deformaciones de rotura son algo inferiores para este pretratamiento. Una mezcla con **deformaciones excesivamente bajas** y muy altas resistencias tendrá un comportamiento **poco flexible**. De esta forma, si en carreteras en servicio se encuentra sometida a altas deflexiones, se puede romper y agrietar con facilidad. Las mezclas fabricadas con AR preenvuelto con **ECL-2d** tienen una menor resistencia a tracción indirecta y mayores deformaciones verticales de rotura. En principio parecen menos rígidas, pero habrá que analizar si se deforman con mucha facilidad, dando lugar a elevadas **deformaciones permanentes**.

7.3.2.3 Análisis del contenido de huecos

En la figura 7.19 se representan los huecos en mezcla en función del contenido de ligante para los cuatro contenidos de AR. En ella se comparan las muestras fabricadas con los dos pretratamientos. Como era de esperar, en líneas generales, el contenido de huecos en mezcla tiende a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de ligante en la mezcla. De ahí se deduce que a mayor contenido de ligante, más fácil será la compactación y más ligante habrá para rellenar los huecos. Sin embargo, también se observan puntos que se salen de esta tendencia general, como el obtenido para la mezcla con un 30% de AR preenvuelto con ECL-2d y un 3,0% de betún.

Puede apreciarse en la figura 7.19 que en la mayor parte de los casos, **para un mismo contenido de ligante, las mezclas bituminosas que se han dejado reposar 4 horas en estufa presentan un V_m más elevado que las fabricadas con AR preenvuelto con emulsión**. La absorción de ligante por parte del AR durante el reposo de 4 horas en estufa, provoca que para un mismo porcentaje de ligante, la cantidad de ligante efectivo sea inferior. Por ello compactar la probeta requiere mayor esfuerzo y además la cantidad de

ligante empleada en rellenar los huecos en el árido mineral también será menor. A esto se añade el hecho de que en las mezclas con AR preenvuelto la cantidad de ligante es ligeramente superior, pues hay que tener en cuenta también el betún procedente de la emulsión. Todo esto explicaría que las mezclas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa presenten un mayor porcentaje de huecos de aire que las mezclas con AR preenvuelto.

Es bien conocido el efecto negativo que tiene un contenido de huecos de aire elevado sobre el envejecimiento de la mezcla bituminosa: con un gran contenido de huecos de aire (V_m), el proceso de envejecimiento se producirá de forma más acelerada, por lo que la **durabilidad** de la mezcla será menor (Khandal y Chakraborty, 1996). Por otro lado, el contenido de huecos de aire no debe ser demasiado bajo. En este sentido un contenido de huecos de aire adecuado garantiza que haya espacio suficiente para **albergar el ligante** ante una posible expansión del mismo o una posible post compactación debida a los efectos del tráfico (Pennsylvania Department of Transportation, 2003). Además un contenido mínimo del 3% de huecos en mezcla (V_m) previene la formación de **roderas** (Murali Krishnan y Rajagopal, 2004). Por tanto, parece que a priori, las mezclas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa podrían tener una durabilidad inferior; mientras que las mezclas con AR preenvuelto con emulsión podrían presentar un menor margen para permitir compactaciones durante la vida de servicio o expansiones de ligante debidas a variaciones térmicas. Sin embargo, es preciso recalcar en este punto, como ya se comentó anteriormente, que las mezclas fabricadas con cualquiera de los dos pretratamientos presentan en general **huecos en mezcla adecuados para satisfacer los requisitos del PG-3 en las categorías de tráfico más elevadas**. Es decir, del análisis del contenido de huecos en mezcla no se puede concluir que la mezcla fabricada con uno de los pretratamientos vaya a tener un mejor comportamiento mecánico que la mezcla fabricada con el otro pretratamiento.

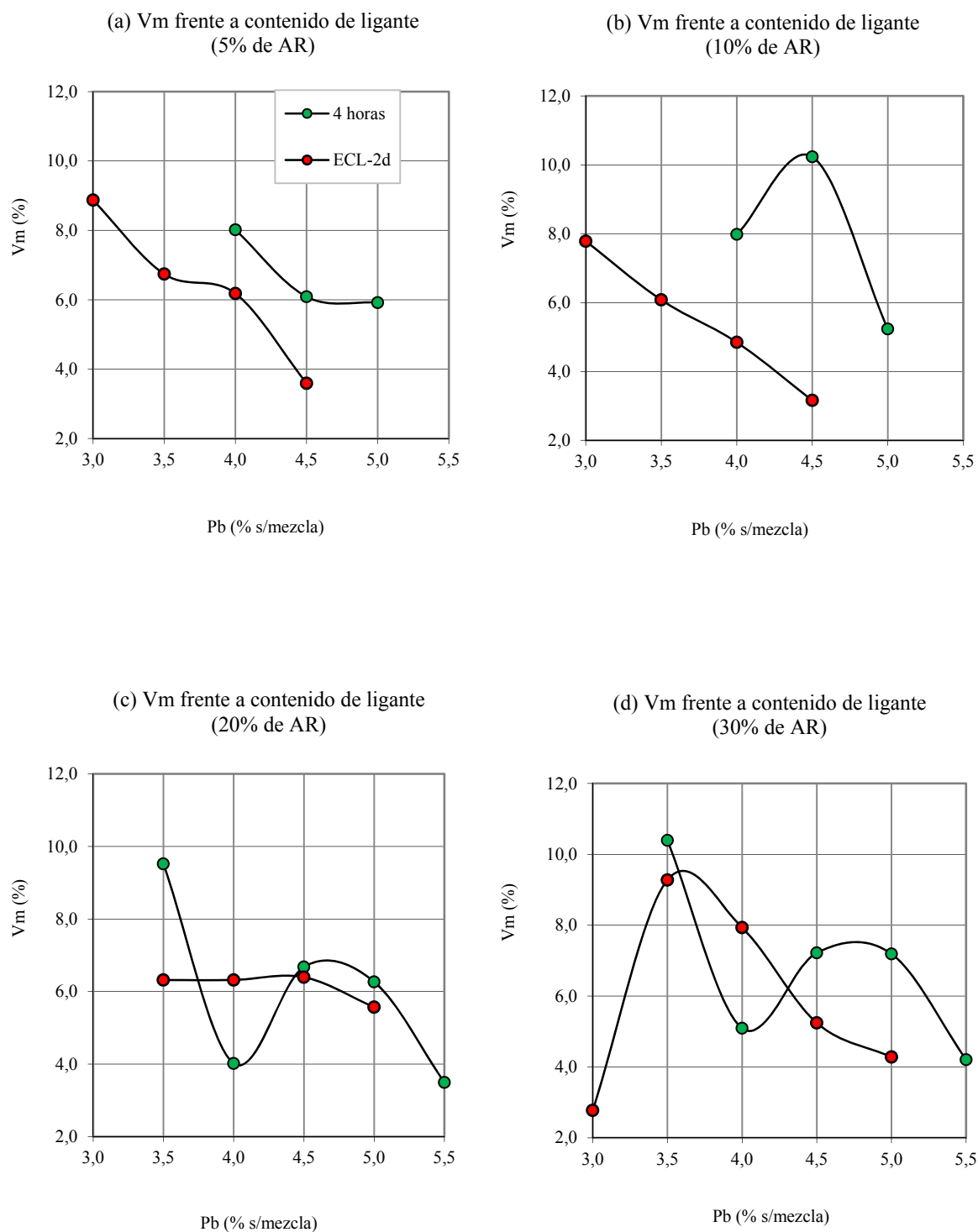


Figura 7.19.- Huecos en mezcla para ambos pretratamientos (4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d): (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.

En la figura 7.20 se representa el contenido de huecos en el árido mineral en función del contenido de ligante para ambos pretratamientos. Puede verse como de forma general el contenido de **huecos en el árido mineral** de las mezclas que se dejan reposar **4 horas en estufa es superior al de las mezclas que se fabrican con AR preenvuelto**, al igual que en el caso de los huecos en mezcla, confirmando los resultados obtenidos en la figura anterior.

Es preciso señalar que si se tiene en cuenta en la determinación de VMA el ligante absorbido, se obtienen resultados similares, pero de inferior valor, ya que no tener en cuenta el ligante absorbido sobreestima el contenido de huecos en el árido mineral. Como puede verse en las tablas 7.3 y 7.4 y en la figura 7.20, el valor de VMA_{abs} para las mezclas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa cumple en la mayor parte de los casos con las especificaciones del PG-3; mientras que para las mezclas con AR preenvuelto no se llega al mínimo del 14% en ninguna ocasión.

Como es bien sabido es preferible una mezcla con un alto contenido de huecos en el árido mineral, ya que presenta numerosas ventajas (Pennsylvania Department of Transportation, 2003) como una **mayor flexibilidad**, una **mayor resistencia a la fisuración por bajas temperaturas**, un **mayor espacio** para permitir la **expansión del betón** y asumir la **post compactación** debida al tráfico durante la vida de servicio e incluso una **variación en el contenido de ligante durante su producción en planta**. Aunque hay que tener en cuenta que si el elevado contenido de huecos en el árido mineral se produce a la vez que un excesivo contenido de huecos en mezcla, podría haber problemas de durabilidad. Como se ha comentado anteriormente el contenido de huecos de aire de las mezclas fabricadas con los dos pretratamientos satisface los requisitos del PG-3 en las categorías de tráfico pesado más elevadas.

Por tanto, parece que el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa dará lugar a mezclas con un contenido de huecos en el árido mineral más adecuado. Sin embargo, hay que recalcar que ambos pretratamientos dan lugar a mezclas con un contenido de **huecos en el árido mineral (VMA)** que **cumple con las especificaciones españolas** al respecto.

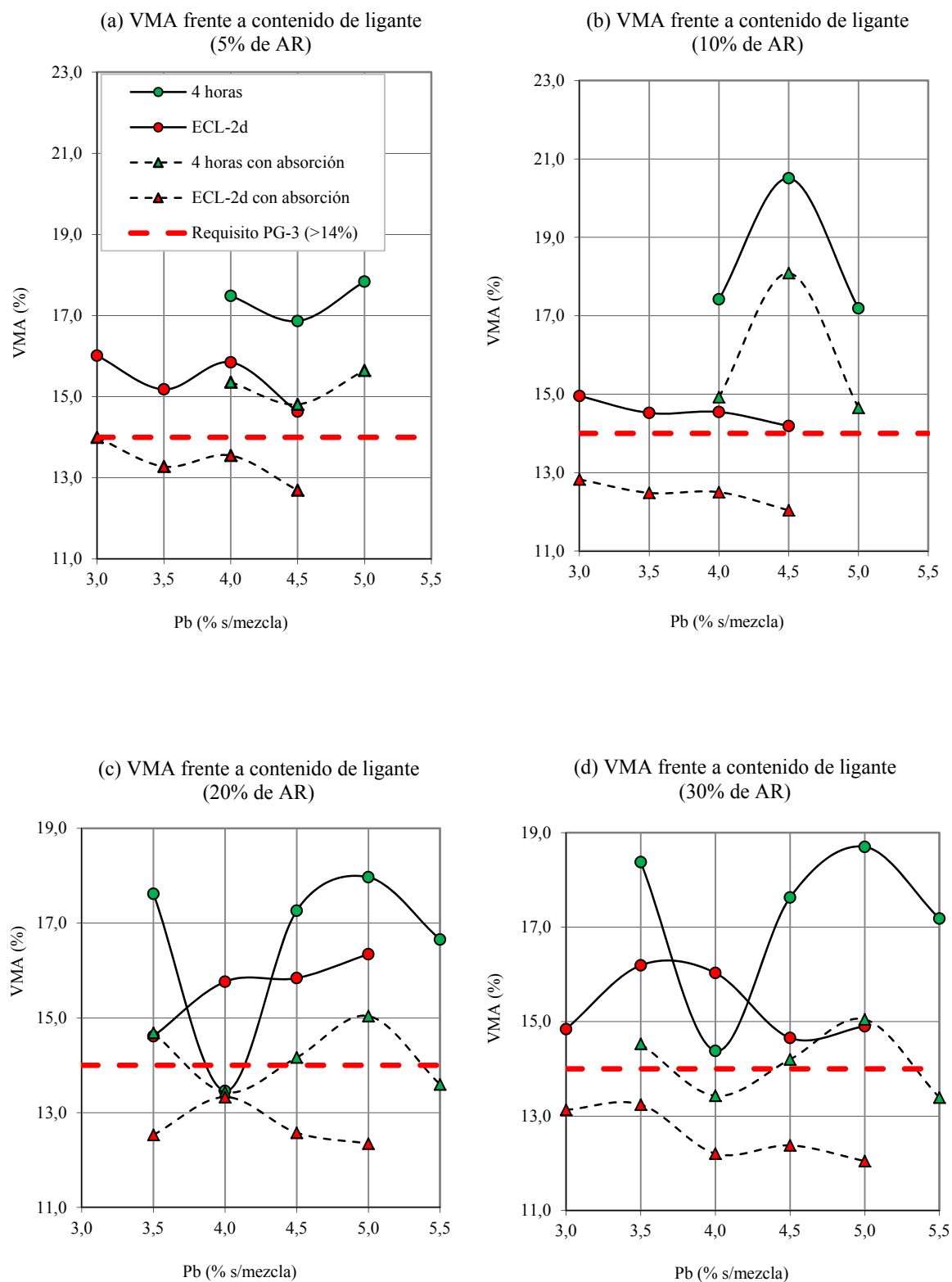


Figura 7.20.- Huecos en el árido mineral para ambos pretratamientos (4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d): (a) 5% AR, (b) 10% AR, (c) 20% AR y (d) 30% AR.

7.3.2.4 Consideraciones finales

Recapitulando las ideas vistas a lo largo del apartado 7.3.2, se puede decir que **ambos pretratamientos** (4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d) ofrecen **resultados satisfactorios** en cuanto a la **sensibilidad al agua**. No se puede decir que un pretratamiento sea mejor que el otro en cuanto a sensibilidad al agua, pero sí que ambos dan lugar a mezclas resistentes a la acción del agua ($ITSR \geq 80\%$).

También se ha visto que en las mezclas fabricadas con el pretratamiento **de 4 horas de reposo en estufa** las **resistencias a tracción indirecta son más elevadas**; mientras que las **deformaciones son más bajas**. A priori no se puede decir si esto da lugar a mezclas poco flexibles, que se agrietan con facilidad, pues es necesario analizar si las deformaciones son excesivamente bajas, es decir, si la mezcla es excesivamente **rígida**. Con el pretratamiento de preenvuelta del AR con **ECL-2d** las resistencias a tracción indirecta son más bajas y las deformaciones verticales de rotura más elevadas. En este caso será preciso analizar con detalle la resistencia a la **deformación permanente**.

Además, el análisis del contenido de huecos indicó que las mezclas fabricadas con el pretratamiento de **4 horas de reposo en estufa** presentaban contenidos de **huecos en mezcla mayores** que las mezclas fabricadas con el AR preenvuelto con emulsión. Esto es así debido a que la cantidad de **ligante efectivo es inferior** en las mezclas sometidas al pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. Por ello la compactación de la probeta requiere un mayor esfuerzo y además la cantidad de ligante empleada en rellenar los huecos en el árido mineral también será menor. Esto implica que las mezclas fabricadas con el pretratamiento de 4 horas en estufa podrían tener una **menor durabilidad**; mientras que las fabricadas con **AR preenvuelto con emulsión** podrían **disponer de menor espacio** para asumir **expansiones del betún** y **post-compactaciones** debidas al tráfico. Aunque cabe recordar que tanto el contenido de huecos en mezcla como el contenido de huecos en el árido mineral satisfacen los requisitos del PG-3 para categorías de tráfico elevadas, en las mezclas fabricadas con ambos pretratamientos, por lo que no debería haber problemas en este sentido.

Así mismo, el análisis del contenido de huecos también indicó que las **mezclas fabricadas con AR preenvuelto** con emulsión podrían tener un contenido de huecos en el árido mineral insuficiente, si se considera en su determinación la absorción de ligante. Por tanto,

este tipo de mezcla es **menos flexible y resistente a la fisuración** y es más **difícil garantizar que haya espacio suficiente** para soportar la post **compactación** debida al tráfico o las **expansiones** del ligante o posibles variaciones en la cantidad de ligante como consecuencia de su proceso de **fabricación** en planta.

A la vista del análisis realizado no se puede concluir que un pretratamiento sea más adecuado que el otro. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, parece que puede ser más fácil adaptar las plantas de fabricación de mezcla bituminosa en caliente para llevar a cabo el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa que el pretratamiento de preenvuelta del AR con emulsión. A priori, almacenar la mezcla suelta durante 4 horas antes de su extendido y compactación parece más viable que realizar la envuelta del AR y almacenarlo hasta la rotura de la emulsión. En este sentido, cabe comentar que la mezcla bituminosa sufre un proceso de transporte desde la planta de fabricación al tajo. Este tiempo de transporte podría considerarse incluido dentro de las 4 horas de pretratamiento, luego el tiempo de almacenamiento sería incluso inferior a las 4 horas. Además, existen en el mercado dispositivos que permiten el almacenamiento de la mezcla suelta en caliente (ej: asphalt thermo containers). Para adaptar la planta al pretratamiento de preenvuelta del AR con emulsión, sería preciso disponer de una mezcladora en frío y una tolva para almacenar el AR preenvuelto hasta su rotura. Durante la fabricación de las probetas en el laboratorio ha podido observarse que, mientras se produce la rotura de la emulsión, el AR preenvuelto queda apelmazado, siendo difícil su separación y, por tanto, su dosificación. Por tanto, sería necesario disponer algún dispositivo en planta que evitase esto.

Aunque ambos pretratamientos mostraron una satisfactoria sensibilidad al agua, desde el punto de vista práctico parece más sencillo fabricar mezclas con 4 horas de reposo en estufa. Para finalmente determinar si este pretratamiento es más aconsejable hace falta aclarar varias cuestiones:

- En primer lugar (apartado 7.3.3), estudiar la relación entre el tiempo de reposo en estufa y la sensibilidad al agua. Es posible que menores tiempos de reposo también sean eficaces.
- En segundo lugar (apartado 7.4), se analiza si para el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa las deformaciones son excesivamente bajas y las resistencias excesivamente altas. Como se acaba de comentar, en este caso, las mezclas se

podrían agrietar con mayor facilidad frente a las cargas repetidas de tráfico. Para el análisis preliminar de esta cuestión se ha optado por realizar el ensayo Marshall a las mezclas bituminosas fabricadas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. Cabe comentar que este análisis no está considerado en el vigente PG-3.

- En tercer lugar, para ambos pretratamientos es preciso realizar un exhaustivo análisis de las propiedades mecánicas, como su rigidez, resistencia a las deformaciones permanentes y resistencia a la fatiga (capítulo 8). Cabe señalar que el estudio de la rigidez y de la fatiga para las mezclas de tipo AC 22 base G no se considera en el vigente PG-3.

7.3.3 Relación entre el tiempo de reposo en estufa y la sensibilidad al agua

En el estudio de la afinidad del árido con el ligante realizado en el capítulo 6, se comprobó que a partir de 2 horas de reposo en estufa el recubrimiento de los áridos mejoraba notablemente, obteniéndose los mejores resultados de recubrimiento para tiempos de 3 y 4 horas de permanencia en estufa. Por ello, puesto que el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa se perfila como el más idóneo, resulta de interés analizar la relación entre el tiempo de reposo en estufa y la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con sustitución parcial de AR. No solo para corroborar la efectividad del pretratamiento, sino también para contrastar los resultados obtenidos mediante el ensayo del “Boiling Water Test” (apartado 6.5.1.1.) con los obtenidos en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión descritos en este apartado. Además este análisis también permitirá analizar la correlación entre ambos ensayos.

Por otro lado también es interesante profundizar en el conocimiento de la relación entre el tiempo de reposo en estufa y el contenido de huecos, la sensibilidad al agua y la resistencia a tracción indirecta de las probetas de mezcla bituminosa fabricadas con AR.

Para ello se han llevado a cabo ensayos de tracción indirecta tras inmersión sobre probetas de mezcla bituminosa con un porcentaje del 20% de AR, un 4% de polvo mineral de cemento Portland gris y un 4,5% de betún B50/70. Se ha escogido un 20% de AR con un 4,5% de ligante, ya que los resultados de sensibilidad al agua con 4 horas de reposo en estufa indicaron que es la mezcla que presenta menores daños frente al agua (ITSR=99,93%). Por tanto, el rango el que se moverán los ITSR de las mezclas que se

dejen menor tiempo de reposo en estufa es el más amplio posible (entre 0% y 99,93%). Así se podrá apreciar claramente la relación entre el tiempo de reposo en estufa y la sensibilidad al agua. Se han estudiado cinco series de probetas incrementando sucesivamente en cada una el tiempo de reposo en estufa en intervalos de una hora, desde las 0 horas de la primera serie hasta las 4 horas de la quinta serie (tabla 7.5). Cada una de las series consta de 10 probetas para determinar el ITSr y otras 2 para determinar la densidad máxima y la densidad aparente (60 probetas en total). Los resultados obtenidos tras la realización del ensayo de tracción indirecta tras inmersión pueden verse en la tabla 7.5 adjunta:

Serie	Reposo en estufa (h)	ITSr (%)	ITSd (MPa)	ITSw (MPa)	VMA (%)	VMA _{abs} (%)	Vm (%)	Categoría de tráfico pesado
20C-0H	0	77,97	2,206	1,720	15,95	13,43	5,28	T00, T0, T3, T4
20C-1H	1	86,79	2,472	2,145	16,60	13,31	5,91	
20C-2H	2	88,07	2,472	2,177	16,80	13,46	6,13	T00 a T4
20C-3H	3	85,38	2,430	2,075	18,82	15,75	8,43	T1 a T4
20C-4H	4	99,93	1,888	1,887	17,26	14,16	6,68	T00 aT4

Tabla 7.5.- Resultados del ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Varios tiempos de reposo en estufa.

Puede verse en la tabla 7.5 que con 0 horas de reposo en estufa, la mezcla con el 20% de AR no alcanza el valor mínimo del 80% prescrito por el PG-3 para capas de base. A partir de 1 hora de tiempo de reposo en estufa ya se cumple este requisito. Además, puede verse en la tabla 7.5 que todas las mezclas ensayadas presentan un Vm y un VMA que las hace aptas para la categoría de tráfico pesado más alta, es decir, la T00. La única excepción la constituye la mezcla con 3 horas de reposo en estufa que es apta para una categoría de tráfico pesado alta, pero algo inferior, la T1. Si se tuviese en cuenta la absorción de ligante solo las mezclas con 3 y 4 horas de reposo en estufa alcanzarían el mínimo del 14%, aunque a las demás poco les falta.

Para facilitar la interpretación de los resultados de la tabla 7.5, en la figura 7.21 se ha representado el valor de la resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo y del ITSr en función del tiempo de reposo en estufa. Como puede verse las resistencias a tracción indirecta en seco y en húmedo aumentan con el tiempo de reposo en estufa hasta llegar a las 2 horas, momento a partir del cual se mantienen prácticamente constantes. A partir de las 3 horas, empiezan a disminuir seguramente debido a la evaporación de volátiles del

betún como consecuencia del elevado tiempo de permanencia en estufa. Esta reducción es más evidente en el caso de la resistencia en seco de la mezcla fabricada con 4 horas de reposo en estufa.

Además, en la figura 7.21 puede apreciarse que la resistencia conservada a tracción indirecta tiene una clara tendencia a ir aumentando a medida que se deja la mezcla un mayor tiempo de reposo en la estufa, lo cual evidencia la efectividad del pretratamiento aplicado frente a la sensibilidad al agua. En este sentido hay que matizar que el fuerte incremento experimentado por el ITSR en el caso de las mezclas que se dejan reposar 4 horas en estufa tiene su origen en una disminución tanto de la resistencia en seco a tracción indirecta como de la efectividad del pretratamiento. Aun así, si se compara con la resistencia en seco de las probetas que se dejaron reposar 0 horas en estufa, la diferencia no es sustancial. Además, sigue siendo más elevada que la conseguida con el pretratamiento de preenvuelta del AR con emulsión (figura 7.15c).

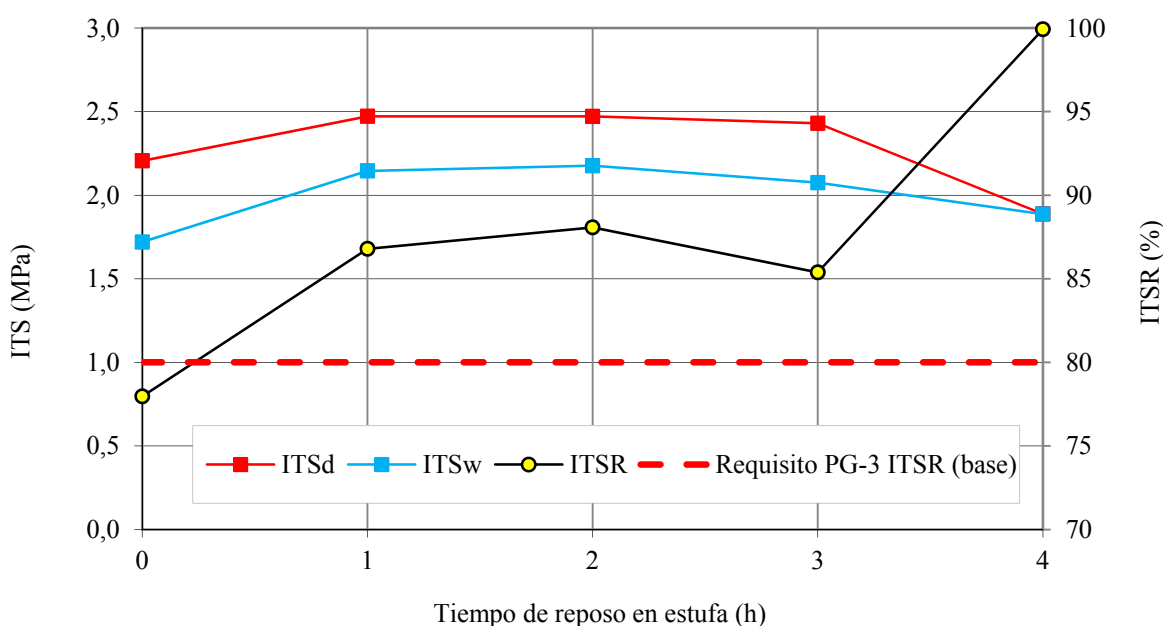


Figura 7.21.- ITSd, ITSw e ITSR frente a tiempo de reposo en estufa para una mezcla con el 20% de AR y un 4,5% de ligante.

También para facilitar la interpretación de los resultados incluidos en la tabla 7.5, se representa en la figura 7.22 el contenido de huecos en mezcla y huecos en el árido mineral en función del tiempo de reposo en estufa. Puede verse que, de forma general, el contenido de huecos en mezcla (V_m) y de huecos en el árido mineral (VMA) aumenta ligeramente

con el tiempo de reposo en estufa. Esta tendencia podría deberse a que a medida que aumenta el tiempo de reposo en estufa se va produciendo una mayor absorción de ligante por parte de los poros del AR, por lo que también se tiene una menor cantidad de ligante efectivo, con lo cual la compactación de la mezcla se dificulta ligeramente y se tiene una menor cantidad de ligante para rellenar los huecos en el árido mineral.

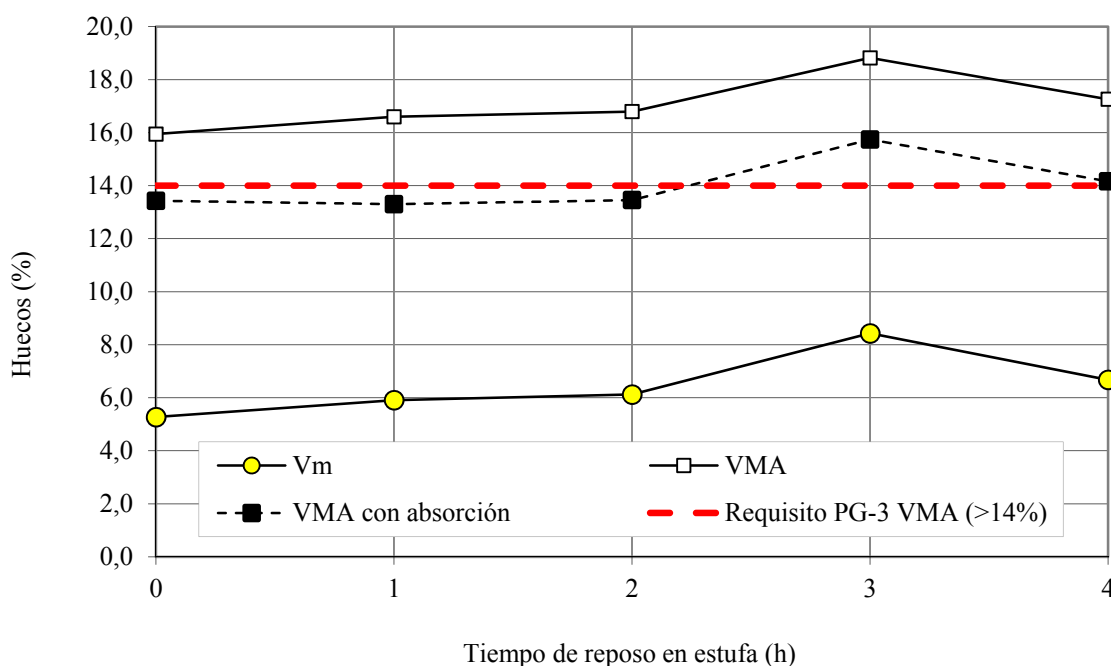


Figura 7.22.- Vm y VMA frente a tiempo de reposo en estufa para una mezcla con el 20% de AR y un 4,5% de ligante.

Otra causa del ligero aumento en el contenido de huecos podría ser la siguiente: al aumentar la absorción de ligante, el AR se vuelve menos fragmentable. Es decir, sería menos susceptible a romperse durante el proceso de mezclado y compactación de la mezcla. Así, se producirían menos finos que rellenen huecos, por lo que el contenido de huecos en mezcla y de huecos en el árido mineral sería mayor. Sin embargo, puede afirmarse que esto no ocurre. En este sentido se ha repetido el ensayo realizado en el apartado 7.2.4 para determinar la estabilidad granulométrica de las mezclas fabricadas con AR. Se han empleado las mismas dosificaciones (4% de ligante y 0%, 5%, 10%, 20% y 30% de AR), pero dejando las mezclas reposar 4 horas en estufa. Como puede verse en la figura 7.23 se ha obtenido que el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa no mejora, en general, la estabilidad granulométrica del AR.

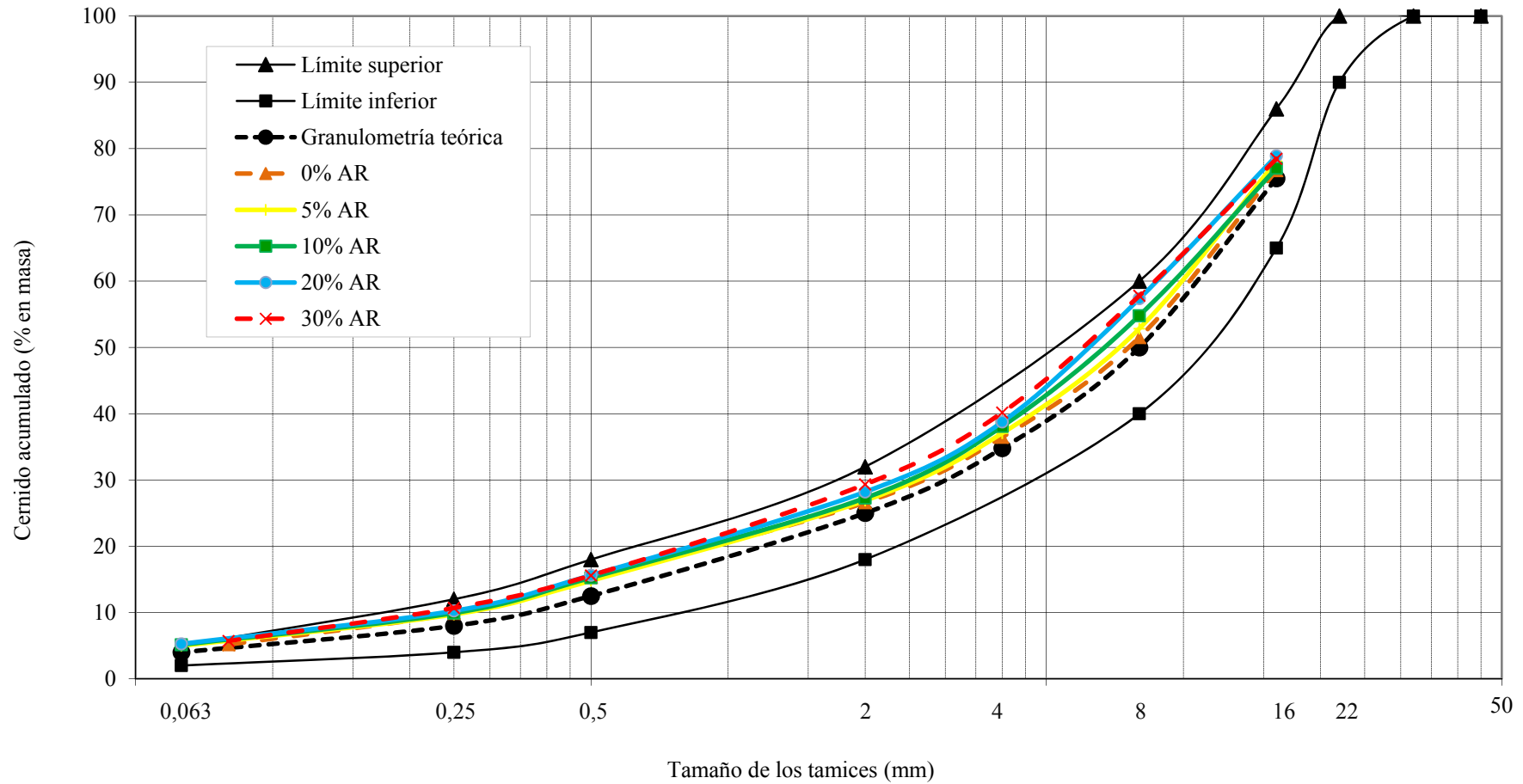


Figura 7.23.- Granulometría de las mezclas bituminosas fabricadas con AR tras mezclar, dejar reposar 4 horas en estufa a 170°C y compactar. Obtenida a partir de los áridos recuperados.

Por otro lado, en el capítulo 6 se estudió la influencia del tiempo de permanencia en estufa de la mezcla mediante el ensayo del “Boiling Water Test”. En este sentido, se obtuvo que el revestimiento para 0 horas de reposo en estufa era el peor (20%), mejorando algo para 1 hora (50%) y mejorando notablemente a partir de 2 horas (90%). Los mejores recubrimientos se obtenían para 3 y 4 horas de reposo en estufa (95%), siendo ligeramente superior el obtenido para 4 horas. En este ensayo la mezcla suelta estaba fabricada íntegramente con AR. Si se comparan los resultados del ensayo del “Boiling Water Test” con los de tracción indirecta tras inmersión (figura 7.24) queda claro que ambos presentan la misma tendencia: la sensibilidad al agua mejora a medida que aumenta el tiempo de reposo en estufa. Sin embargo, en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión, para los tiempos de reposo en estufa de 1 hora, 2 horas y 3 horas se producen valores de ITSR muy similares y ya por encima de los mínimos exigidos por el PG-3; mientras que para 4 horas el valor de ITSR aumenta notablemente. Por tanto puede decirse que ambos ensayos presentan una misma tendencia general, aunque difieren en los resultados intermedios.

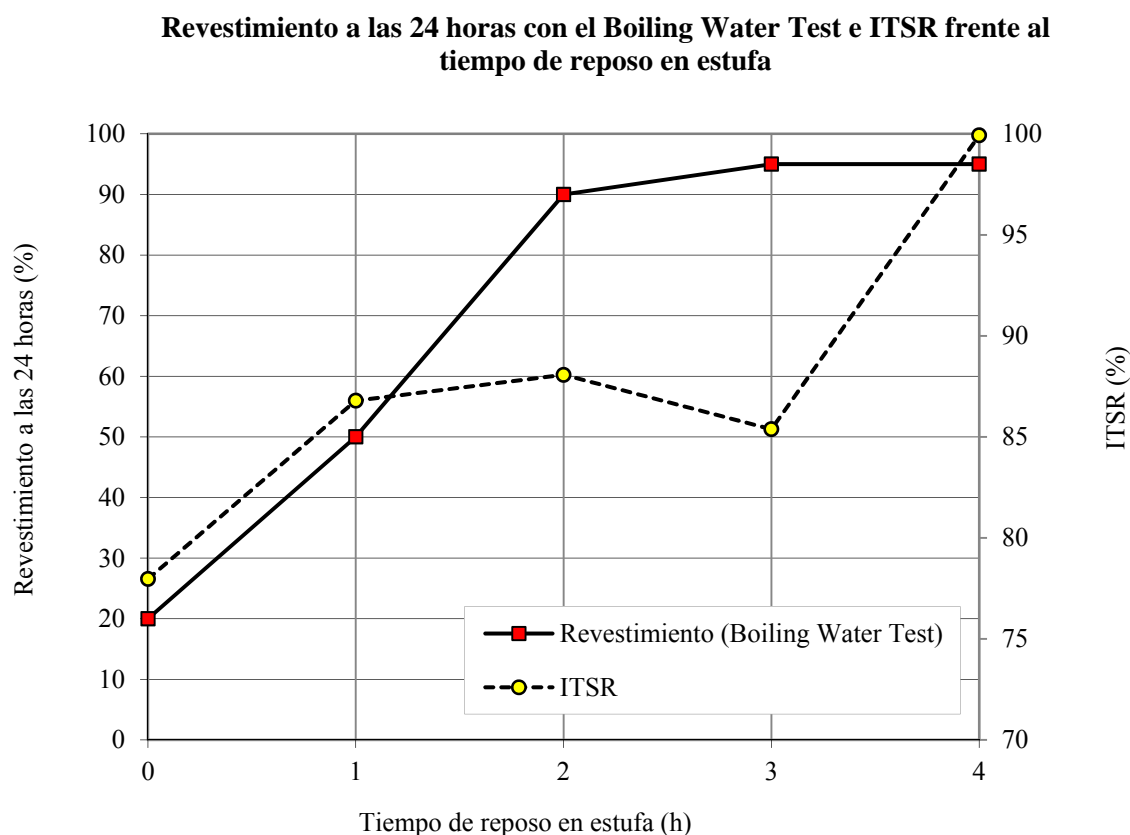


Figura 7.24.- Comparación entre los resultados obtenidos para el revestimiento a las 24 horas con el “Boiling Water Test” y el ITSR. Mezcla con un 20% de AR y un 4,5% de betún.

7.4 DOSIFICACIÓN Y ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD AL AGUA CON LOS CONTENIDOS ÓPTIMOS DE BETÚN

7.4.1 Introducción

Como se comentó anteriormente, el pretratamiento consistente en dejar reposar la mezcla 4 horas en estufa antes de su compactación, se perfila como el más idóneo. Sin embargo, resulta fundamental profundizar en su estudio y, además, analizar si podría dar lugar a mezclas con un riesgo excesivo de fisuración ante las cargas de tráfico. Por todo ello, se consideró oportuno realizar el ensayo Marshall a las mezclas fabricadas con este pretratamiento y, a continuación, con el contenido óptimo de ligante llevar a cabo el ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Así mismo, se ha considerado adecuado dosificar y ensayar a tracción indirecta mezclas sin pretratamiento que sirvan de comparación (mezcla de control).

El análisis de los valores tanto de la deformación y de la estabilidad Marshall como de la resistencia y de la deformación a tracción indirecta de las mezclas optimizadas puede esclarecer si se corresponden con mezclas excesivamente frágiles. Además, puesto que con el ensayo Marshall se obtiene el contenido óptimo de ligante, se permite optimizar el diseño de las mezclas y establecer su idoneidad mediante el análisis de diversos parámetros tales como el contenido de huecos en mezcla, los huecos en el árido mineral, la resistencia conservada a tracción indirecta tras inmersión, etc.

Para proceder a la dosificación y análisis de la sensibilidad al agua se han ensayado probetas de la mezcla bituminosa AC 22 base G fabricadas con la misma sustitución parcial de AR procedente de RCD (0%, 5%, 10%, 0% y 30% de AR).

A la hora de determinar el contenido óptimo de ligante, se han tenido en cuenta tanto los criterios del vigente PG-3 (Ministerio de Fomento, 2008) como del antiguo PG-3 (Ministerio de Fomento, 2004) como se explica con detalle más adelante. A medida que se ha ido avanzando en la ejecución de los ensayos se fue realizando una comparación de los resultados obtenidos, tanto en el ensayo Marshall como en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión, para las mezclas fabricadas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa y para las mezclas sin pretratamiento. En ambos casos para los óptimos Marshall correspondientes.

A la vista de lo estudiado en el estado del arte y del análisis de la afinidad entre el árido y el ligante realizado en el capítulo anterior, es previsible que las mezclas fabricadas sin pretratamiento no presenten una buena sensibilidad al agua. Por tanto, también se pretende confirmar, por un lado, que, efectivamente, las probetas fabricadas con sustitución parcial de AR no presentan un buen comportamiento frente a la acción del agua y, por el otro, que con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa se mejora notablemente la sensibilidad al agua de estas mezclas.

7.4.2 Dosificación de las mezclas mediante el ensayo Marshall y análisis de sus propiedades

La dosificación de las mezclas bituminosas se ha llevado a cabo mediante la realización del ensayo Marshall. Como es sabido, para este ensayo es preciso fabricar varias series de probetas cilíndricas de mezcla bituminosa con distintos contenidos de betún. Como mínimo se han analizado cuatro contenidos de betún. Su valor y la necesidad de analizar un mayor número de contenidos de ligante se ha ido viendo según las necesidades surgidas en la propia realización del ensayo.

Siguiendo las indicaciones de la norma NLT-159/86 (MOPT, 1992), para cada contenido de ligante se han fabricado 5 probetas, en lugar de las 3 probetas del caso general, pues al ser la mezcla de estudio de granulometría gruesa (AC 22 base G), puede presentar mayores dispersiones en los resultados que otras granulometrías más cerradas.

La temperatura de fabricación ha sido de 170°C (figura 7.5); mientras que la de compactación ha sido de 160°C. Todas las probetas se compactaron con 75 golpes por cara de la maza Marshall (figura 7.6). Una vez fabricadas y enfriadas a temperatura ambiente, las probetas son introducidas en un baño de agua a 60°C durante 35 minutos (figura 7.7). Transcurrido ese tiempo, se ensayan las probetas a compresión hasta su rotura con velocidad de desplazamiento constante en la prensa Marshall para determinar su estabilidad y deformación (figura 7.25). El proceso de ejecución del ensayo se detalla en la norma NLT-159/86.



Figura 7.25.- Rotura de probetas con mordaza Marshall.

En las probetas Marshall realizadas es especialmente importante tener en cuenta que el polvo mineral utilizado es un cemento portland compuesto CEM II/B-M (V-L) 32,5 N, descrito en el capítulo 5. Únicamente en la serie 00N-0H se utiliza el polvo mineral procedente de la corneana. Con el 0% de AR, se han utilizado dos polvos minerales diferentes con el fin de ver la diferencia de comportamiento resistente y frente al agua de ambos. En todos los casos, tal y como se ha comentado anteriormente, se ha escogido un porcentaje de polvo mineral del 4% sobre la masa total del árido.

Para las mezclas con pretratamiento se han fabricado 120 probetas compactadas (20 para determinar la densidad aparente y 100 para su posterior rotura). También se han fabricado 20 probetas de mezcla suelta, para determinar la densidad máxima, resultando un total de 140 probetas. Para las mezclas sin pretratamiento se han fabricado 168 probetas (24 para densidad aparente, 24 para densidad máxima y 120 para rotura). La designación y principales características de las probetas estudiadas mediante el ensayo Marshall aparecen reflejadas en la tabla 7.6.

Serie			Pb s/mezcla	% de AR (*)	Serie			Pb s/mezcla	% de AR (*)
4 horas de reposo en estufa	00N-4H	-	0%	Sin pretratamiento	00N-0H (**)	3,0%	0%		
		-				3,5%			
		-				4,0%			
		-				4,5%			
	00C-4H	3,0%	0%		00C-0H	3,0%	0%		
		3,5%				3,5%			
		4,0%				4,0%			
		4,5%				4,5%			
	05C-4H	-	5%		05C-0H	3,0%	5%		
		4,0%				4,0%			
		4,5%				4,5%			
		5,0%				5,0%			
		5,5%				-			
		-				6,0%			
	10C-4H	-	10%		10C-0H	3,0%	10%		
		4,0%				4,0%			
		4,5%				4,5%			
		5,0%				5,0%			
		5,5%				-			
		-				6,0%			
	20C-4H	-	20%		20C-0H	3,0%	20%		
		3,5%				-			
		4,0%				4,0%			
		4,5%				4,5%			
		5,0%				5,0%			
		-				6,0%			
	30C-4H	-	30%		30C-0H	3,0%	30%		
		4,0%				4,0%			
4,5%		4,5%							
5,0%		5,0%							
5,5%		-							
-		6,0%							

(*) Sobre el total del árido en masa, incluyendo el polvo mineral.

(**) En este grupo de probetas el polvo mineral es el natural, mientras que en el resto, como ya se ha comentado, es cemento gris.

Tabla 7.6.- Series de probetas fabricadas para el ensayo Marshall.

7.4.2.1 Análisis de las curvas del ensayo Marshall

Tal y como puede verse en las tablas A3.1 y A3.2 del Anexo 3, de la realización del ensayo Marshall se han recogido los siguientes resultados:

- Densidad aparente de las probetas de mezcla bituminosa (ρ_b), expresada en g/cm^3 y obtenida mediante el procedimiento de la superficie saturada (SSD).
- Estabilidad Marshall (E), en kN, que es la carga máxima resistida por la probeta.

- Estabilidad Marshall de proyecto (E_p) expresada en kN. La estabilidad Marshall de proyecto es el 95% de la estabilidad Marshall.
- Deformación Marshall (D), que es la disminución de diámetro expresada en mm que experimenta una probeta entre el comienzo de la carga y el instante de su rotura.
- Deformación Marshall de proyecto (D_p) expresada en mm. La deformación Marshall de proyecto es la comprendida entre la abscisa correspondiente a la carga de 500 N (carga de asentamiento) y la abscisa correspondiente a la estabilidad Marshall de proyecto.
- Huecos en mezcla (V_m) expresado como porcentaje sobre el volumen total de la mezcla compactada.
- Huecos en el árido mineral, expresado como porcentaje sobre el volumen total de la mezcla compactada. Como se ha visto en el apartado anterior, este parámetro se ha determinado de dos formas: sin considerar la absorción de ligante (VMA) y teniendo en cuenta la absorción de ligante (VMA_{abs}).
- Porcentaje de huecos rellenos con ligante existentes en el árido mineral. Al igual que en el caso anterior el valor de este parámetro también depende de que en su determinación se tenga en cuenta el ligante absorbido (VFB_{abs}) o no (VFB). En el Anexo 2 se explica con detalle tanto la determinación de este parámetro como el de los huecos en mezcla y los huecos en el árido mineral.
- Módulo Marshall (M) y módulo Marshall de proyecto (M_p), resultado de dividir la estabilidad Marshall entre la deformación Marshall, en kN/mm.

Además, para determinar el contenido óptimo de ligante, con los valores medios obtenidos anteriormente (tablas A3.1 y A3.2) para cada uno de los contenidos de ligante ensayados se han realizado los siguientes gráficos (figuras 7.26 y 7.27):

- Densidad aparente (ρ_b) de la mezcla bituminosa frente a contenido de ligante.
- Estabilidad Marshall de proyecto (E_p) frente a contenido de ligante.

- Deformación Marshall de proyecto (D_p) frente a contenido de ligante.
- Huecos en mezcla (V_m) frente a contenido de ligante.
- Huecos en el árido mineral (VMA y VMA_{abs}) frente a contenido de ligante.

Por otro lado, también se ha realizado el gráfico de huecos rellenos de ligante (VFB y VFB_{abs}) frente a contenido de ligante, con el fin de facilitar el análisis de los resultados (figura 7.28). Además, puesto que puede ser de interés de cara a estudiar la rigidez de la mezcla, se ha considerado oportuno representar el módulo Marshall de proyecto (M_p) en función del contenido de ligante (figura 7.29).

En las figuras 7.26 y 7.27, se representa la densidad aparente de las probetas de mezcla bituminosa en función del contenido de ligante. Si se analiza este gráfico, se puede observar que al igual que en las curvas típicas, la curva de densidad aparente frente a contenido de ligante obtenida es, en general, creciente hasta alcanzar un máximo, a partir del cual se mantiene prácticamente constante durante un cierto intervalo y a continuación decrece ligeramente. En las mezclas que se han fabricado dejándolas reposar 4 horas en estufa (figura 7.26), para los porcentajes del 20% y 30% de AR, el rango de contenidos de ligante ensayado no ha sido suficiente para definir la totalidad de la curva. Por ello, no se ha llegado a alcanzar el máximo de la densidad aparente.

Además, se puede apreciar una correlación entre el porcentaje de AR y la densidad aparente: en general, **a medida que aumenta el porcentaje de AR, la densidad aparente disminuye**. Esto es debido a la menor densidad de los ARs, como consecuencia de la presencia de mortero adherido en los mismos.

Así mismo, puede verse que, en general, aplicar el **pretratamiento de 4 horas de reposo** en estufa **reduce la densidad aparente de la mezcla**. Esto se debe seguramente a que la mayor absorción de ligante producida durante el reposo en estufa, dificulta la compactación de las probetas. Por tanto, el volumen aparente de las mezclas sometidas a pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa será mayor que el de las mezclas sin pretratamiento.

En las figuras 7.26 y 7.27 también se incluye el gráfico de la Estabilidad Marshall de proyecto en función del contenido de ligante. Al igual que en las curvas típicas, los valores

de la Estabilidad Marshall son crecientes con el contenido de ligante, hasta alcanzar un máximo. A partir del máximo valor de la estabilidad viene una rama descendente de menor pendiente que la ascendente. En la rama creciente el contenido de ligante es bajo, por lo que la estabilidad de la mezcla se debe fundamentalmente al rozamiento interno de los áridos. En cambio, en la rama decreciente el contenido de ligante es alto, por lo que la cohesión es la principal responsable de aportar estabilidad a la mezcla. En el pico de la curva ambos mecanismos, cohesión y rozamiento interno, colaboran por igual en el aporte de estabilidad.

Esta tendencia se aprecia más claramente en la figura 7.27 (mezclas sin pretratamiento), que en la figura 7.26 (mezclas fabricadas tras 4 horas de reposo en estufa). Esto es debido a la elección de los contenidos de ligante ensayados: en las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa se escogieron contenidos superiores, por lo que la rama ascendente (pobre en ligante) quedó peor definida. También se puede encontrar alguna excepción. Así, por ejemplo, en la figura 7.26, puede verse como para el porcentaje del 30% de AR únicamente se obtiene la rama descendente de la curva (rica en ligante), ya que se ensayaron contenidos de betún elevados. Por tanto, en este caso, la curva no ha quedado completamente definida.

Además, del análisis de las curvas que representan la Estabilidad Marshall de proyecto frente al contenido de ligante, se pueden concluir que **no se puede establecer una correlación entre los valores de la Estabilidad Marshall de proyecto y el contenido de AR**, pues la estabilidad es muy variable en función del contenido de ligante. Así por ejemplo, en la figura 7.26, la curva del 20% de AR presenta una estabilidad superior a la alcanzada por los otros porcentajes de AR para el 3,5% de ligante; e inferior a la alcanzada por los otros porcentajes para el 4,5% de ligante. Se puede poner otro ejemplo para la figura 7.27. Así, para un 6% de ligante la máxima estabilidad se da en la mezcla que presenta un 20% de AR; mientras que para un 4% de ligante se da la máxima estabilidad en la mezcla que presenta un 0% de AR.

Así mismo, resulta de interés en la figura 7.27, comparar la curva obtenida para la serie 00N-0H (0% AR y polvo mineral natural) con la obtenida para la serie 00C-0H (0% AR y polvo mineral de cemento). Puede verse como los valores de la estabilidad son mayores para la 00C-0H, en la mayor parte del rango de contenidos de ligante ensayados. Por tanto,

se puede concluir que, en general, **utilizar polvo mineral de cemento gris aumenta la estabilidad de la mezcla.**

Además, si se compara la figura 7.26 con la figura 7.27, puede observarse que los valores de **estabilidad** obtenidos para las mezclas sometidas a **pretratamiento de 4 horas de reposo** en estufa son **mucho más elevados** que los obtenidos para las mezclas sin pretratamiento. De hecho, en la figura 7.26, los valores de estabilidad obtenidos son muy elevados, la mayoría son incluso superiores a 15 kN. El anterior PG-3 (tabla 7.7) exigía que la estabilidad fuese superior a 15 kN para la categoría de tráfico pesado más elevada, es decir, la T00. Por tanto, es evidente que la absorción de ligante por parte del árido mejora la estabilidad de la mezcla. Al llenarse los poros del árido con betún, el propio árido se hace más resistente, con lo cual la estabilidad de la mezcla también se hace mayor.

La estabilidad es una medida de la resistencia a la deformación (Pennsylvania Department of Transportation, 2003). Por tanto, en principio, es deseable que las mezclas presenten una elevada estabilidad. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que valores muy elevados de la estabilidad pueden dar lugar a mezclas difíciles de compactar en campo (Murphy y Bentsen, 2001). Además, mezclas con un valor excesivamente elevado de la estabilidad junto con un valor anormalmente bajo de la deformación son indeseables, pues su contenido de ligante es muy bajo por lo que son demasiado rígidas o frágiles y presentan una mayor susceptibilidad a fisurarse ante los esfuerzos de tráfico (Pennsylvania Department of Transportation, 2003). Esta misma cuestión se había planteado para este pretratamiento tras el análisis de la resistencia y la deformación vertical a tracción indirecta (apartado 7.3.2.3). En este sentido, el análisis de la deformación Marshall es clave para esclarecer si las mezclas fabricadas con este pretratamiento presentan valores anormalmente bajos de la deformación.

Así, en las figuras 7.26 y 7.27 también se representa la deformación Marshall de proyecto en función del contenido de ligante. En ellas se puede observar que, al igual que las curvas típicas, la deformación presenta, de forma general, una tendencia creciente con el contenido de ligante. Esto es así para todos los porcentajes de AR ensayados, aunque existe alguna excepción. Por ejemplo, el 20% de AR en la figura 7.26. Sin embargo, en la figura 7.26 se puede observar como los porcentajes más bajos de AR (0% y 5%) presentan curvas más parecidas a la típica; mientras que en los porcentajes más elevados (10%, 20% y 30% de AR) las curvas presentan más diferencias respecto a la forma habitual como

consecuencia de las heterogeneidades propias del AR (partículas más o menos absorbentes, más o menos angulosas, etc.), más perceptibles cuanto mayor es el porcentaje de AR empleado.

Como puede observarse, **no** existe ninguna **correlación entre la deformación y el porcentaje de AR**. Así por ejemplo, en la figura 7.27, para un 3% de ligante la mezcla que presenta un 30% de AR (30C-0H) es la que más se deforma; mientras que para un 6% de ligante la mayor deformación se da en la mezcla que contiene un 5% de AR (05C-0H).

En la figura 7.27 resulta de interés comprobar que la deformación de la mezcla fabricada con un 0% de AR y polvo mineral natural (00N-0H) es menor que la deformación de la mezcla fabricada con un 0% de AR y polvo mineral de cemento (00C-0H). Esto es así para todo el rango de contenidos de ligante ensayados. Por tanto, a igualdad de contenido de AR y de ligante, podría decirse que utilizar **polvo mineral de cemento gris** da lugar a mezclas con **mayores deformaciones** que si se utiliza polvo mineral natural procedente de la corneana. Esto pone de manifiesto la idoneidad de utilizar polvo mineral de cemento en las mezclas fabricadas con 4 horas de reposo en estufa. Esto es así, ya que, como se ha dicho anteriormente, al presentar estas mezclas estabilidades muy altas, para no dar lugar a mezclas muy rígidas, no deberían tener una deformación excesivamente baja.

Por otro lado, si se comparan las figuras 7.26 y 7.27 se puede ver que, en general, **sin pretratamiento las deformaciones son mayores** que con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. Es decir, las mezclas son más rígidas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. Esto podría deberse a la mayor cantidad de ligante efectivo de las mezclas que no ha sufrido pretratamiento y, por tanto, que no ha absorbido tanto ligante.

Como se ha dicho, deformaciones demasiado bajas con estabilidades excesivamente altas, pueden dar lugar a mezclas con una rigidez desmesurada. Sin embargo, es preciso tener en cuenta que tampoco es deseable que una mezcla presente deformaciones muy altas pues suelen ir acompañadas de estabilidades bajas (Krebs y Walker, 1971), por lo que podrían dar lugar a mezclas poco resistentes a las deformaciones permanentes. Por tanto, para tener una idea de si las deformaciones de las mezclas se encuentran en un rango admisible, es preciso acudir al rango de valores admitido por el PG-3 (tabla 7.7). Como puede observarse la tabla 7.7 indica varios intervalos en función de la categoría de tráfico pesado. Sin embargo, en ninguno de los intervalos se admite que las deformaciones sean inferiores

a 2 mm ni superiores a 3,5 mm. Estos límites se han llevado a los gráficos que relacionan la deformación Marshall de proyecto con el contenido de ligante. Como puede verse, en general, para los contenidos de ligante ensayados, las mezclas se encuentran dentro de este rango. Por tanto, **tanto para las mezclas con pretratamiento de 4 horas en estufa como para las mezclas sin pretratamiento, las deformaciones se encuentran dentro del rango admisible**. Es decir, ni serán excesivamente rígidas si se fabrican con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, ni excesivamente deformables si se fabrican sin pretratamiento. Solo las mezclas sin AR sometidas a pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa podrían ser excesivamente rígidas si se dosifican con contenidos de ligante bajos (<4%).

En las figuras 7.26 y 7.27 también se puede ver la curva de huecos en mezcla (V_m) en función del contenido de ligante. Como era previsible, el porcentaje de huecos en mezcla disminuye a medida que aumenta la cantidad de ligante. Por tanto, para el rango de contenidos de ligante analizado, una mayor cantidad de betún favorece la compactación, dando lugar a mezclas con un menor porcentaje de huecos rellenos de aire. Además, a medida que aumenta el porcentaje de betún hay una mayor cantidad de betún disponible para rellenar los huecos de aire y, en consecuencia, el porcentaje de huecos de aire sobre la probeta se hace menor. No se ha llegado a ensayar el porcentaje de ligante a partir del cual ya no se produce una mejoría en la compactación y su consiguiente reducción de los huecos ocupados por el aire.

Aunque no se puede establecer una correlación clara entre los huecos en mezcla y el porcentaje de AR, parece que existe una **cierta tendencia**: cuanto **mayor es el contenido de AR, mayor es también el contenido de huecos de aire**. Por tanto, cuanto mayor es el contenido de AR **más difícil es la compactación** de la probeta y mayor es la absorción de ligante.

En la figura 7.27 resulta de interés comparar el contenido de huecos en mezcla de las probetas de la serie 00C-0H (0% de AR y polvo mineral cemento) con las de la serie 00N-0H (0% de AR y polvo mineral natural). Ambos contenidos difieren como mucho en un 0,9% (para el 3% de ligante). Además, para los menores contenidos de ligante (3% y 3,5%) es menor el contenido de huecos de aire de la mezcla que presenta polvo mineral natural; mientras que para los mayores contenidos de ligante (4% y 4,5 %) sucede lo contrario.

Todo esto es indicativo de la **escasa influencia** que tiene el **tipo de polvo mineral** escogido en el **contenido de huecos en mezcla** para las probetas sin AR.

Si se comparan las gráficas 7.26 y 7.27 puede observarse que las mezclas con pretratamiento de **4 horas de reposo en estufa** presentan **más huecos en mezcla** que las fabricadas **sin pretratamiento**. Como ya se comentó en el apartado 7.3.2.2. un excesivo contenido de huecos en mezcla podría dar lugar a mezclas con una durabilidad baja. Por tanto podría ser que las mezclas fabricadas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa presentasen una **durabilidad inferior** a las fabricadas sin pretratamiento. En este sentido, en la tabla 7.7 se indica que en ningún caso el PG-3 admite huecos en mezcla inferiores al 5% ni superiores al 9%. Se han representado estos dos valores en los gráficos que relacionan los huecos en mezcla con el contenido de ligante. Como puede verse una buena parte del rango de contenidos de ligante ensayados se encuentra dentro de estos límites. Eso sí, la dosificación con los contenidos de ligante más altos o más bajos puede llevar al incumplimiento de esta condición.

En las figuras 7.26 y 7.27 también se representa el contenido de huecos en el árido mineral en función del contenido de ligante. Como es sabido, la curva de huecos en el árido mineral suele presentar una primera rama descendente y a continuación una rama ascendente. Puede verse que, en general, las curvas se aproximan a la típica, aunque se han dado algunas excepciones. Así, para las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa (figura 7.26), en los porcentajes del 20% y 30% de AR no se da esta tendencia. Esto es debido seguramente a que los contenidos de ligante ensayados no son suficientes para definir la totalidad de la curva, además de las heterogeneidades que pueda introducir la utilización de AR, sobre todo en los porcentajes más elevados.

Como puede verse no tener en cuenta la absorción de ligante sobreestima el valor de VMA, pues se considera que todo el ligante es efectivo y que no hay ligante absorbido. Esto es especialmente evidente en las mezclas fabricadas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, ya que la absorción de ligante por parte del árido es mayor que en las mezclas fabricadas sin pretratamiento.

La diferencia entre VMA_{abs} y VMA también es mayor, en general, cuanto mayor es el porcentaje de sustitución de AR. Esto es indicativo de la mayor absorción de ligante que se produce cuanto mayor es el porcentaje de AR presente en la mezcla. Esta afirmación es

acorde con el hecho de que el AR también presenta una mayor absorción de agua que el árido natural. Por consiguiente cuanto mayor sea su porcentaje de participación en la mezcla, mayor será no solo la absorción de agua, sino también la absorción de ligante.

Parece que hay una cierta tendencia a que aumente el valor de VMA al aumentar el porcentaje de AR. Esto se explica por la tendencia que se ha visto que presenta V_m : aumenta al incrementarse el porcentaje de AR. En cambio VMA_{abs} tiende a disminuir al aumentar AR. Esto se explica por la mayor absorción de ligante que se produce al aumentar la cantidad de AR.

De la comparación de ambas figuras, la 7.26 y la 7.27, también puede verse que el contenido de **huecos en el árido mineral es mayor en las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa** que en las mezclas sin pretratamiento. Ya se comentó en el apartado 7.3.2.2. que un elevado contenido de huecos en el árido mineral da lugar a mezclas **más flexibles, resistentes a la fisuración por bajas temperaturas** y con un **mayor espacio** para permitir la expansión del betún y asumir la post compactación debida al tráfico durante la vida de servicio e incluso una variación en el contenido de ligante durante su producción en planta.

VMA cumple con las prescripciones del PG-3 ($\geq 14\%$) para todo el rango de contenidos de ligante ensayado y todos los porcentajes de AR considerados, tanto para las mezclas con pretratamiento como para las mezclas sin pretratamiento. Si en lugar de VMA se hubiese considerado VMA_{abs} , la mayor parte de las mezclas no cumplirían el requisito $VMA_{abs} \geq 14\%$. Puede verse en el apartado 7.4.2.2. la justificación detallada de la elección de VMA en lugar de VMA_{abs} para dar cumplimiento al requisito del PG-3.

En la figura 7.28 se representa el porcentaje de huecos rellenos con ligante en función del contenido de ligante. Como era previsible, el porcentaje de huecos rellenos con ligante es creciente con el contenido de ligante, pues cuanto mayor sea la cantidad de ligante añadida mayor cantidad de ligante se destinará a rellenar los huecos.

Además, como era de esperar, el porcentaje de huecos rellenos con ligante disminuye cuando se tiene en cuenta la absorción de ligante, para todos los porcentajes de sustitución de AR. Esto pone de manifiesto que tanto el árido natural como el AR absorben ligante. También indica que no considerar la absorción de ligante sobreestima el contenido de

huecos rellenos con ligante. Es interesante señalar que la diferencia entre VFB_{abs} y VFB es mayor cuanto mayor es el porcentaje de sustitución de AR. Esto evidencia que, como era de esperar, el AR absorbe una mayor cantidad de ligante que el árido natural, pues también los valores de absorción de agua son mayores para el AR que para el árido natural, como se ha visto en el capítulo 5. También es interesante comprobar cómo, en general, la diferencia entre VFB_{abs} y VFB es menor cuanto mayor es el contenido de ligante. Esto es así debido a que llega un momento a partir del cual los poros del árido ya no pueden absorber más ligante o lo absorben más difícilmente, pues ya están llenos o prácticamente llenos. Es por ello por lo que a partir de un determinado contenido de ligante la diferencia es menor.

Por otro lado, en general, VFB y VFB_{abs} son mayores en las mezclas sin pretratamiento que en las mezclas sometidas al pretratamiento de 4 horas en estufa, debido a la mayor absorción de betún de estas últimas. Un menor contenido de huecos rellenos de ligante puede dar lugar a mezclas con menor durabilidad (Murphy y Bentsen, 2001). En España, el PG-3 no especifica para qué rango de valores es admisible el contenido de huecos rellenos de ligante, por ello para analizar la durabilidad de la mezcla se recurre habitualmente al contenido de huecos en mezcla. Como se acaba de ver en el análisis de los huecos de aire, las mezclas no tienen por qué presentar problemas de durabilidad si se selecciona adecuadamente el contenido de ligante (ni muy bajo, ni muy alto).

En la figura 7.29 se representa el Módulo Marshall en función del contenido de ligante para las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa (figura 7.29a) y para las mezclas sin pretratamiento (figura 7.29b). En general, las curvas son convexas: el Módulo Marshall aumenta con el contenido de ligante hasta alcanzar un máximo a partir del cual decrece. En la figura 7.29 puede verse que:

- Las mezclas con **pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa** presentan módulos Marshall muy superiores a los obtenidos en las mezclas sin pretratamiento. Por tanto, la absorción de ligante rigidiza la mezcla. Así, estas mezclas tendrán previsiblemente una **mayor resistencia a la deformación permanente** que las mezclas sin pretratamiento.
- Parece que las mezclas sin AR son las que tienen un Módulo Marshall superior. Sin embargo, dentro de las mezclas con AR no parece existir relación entre el contenido de AR y el módulo Marshall.

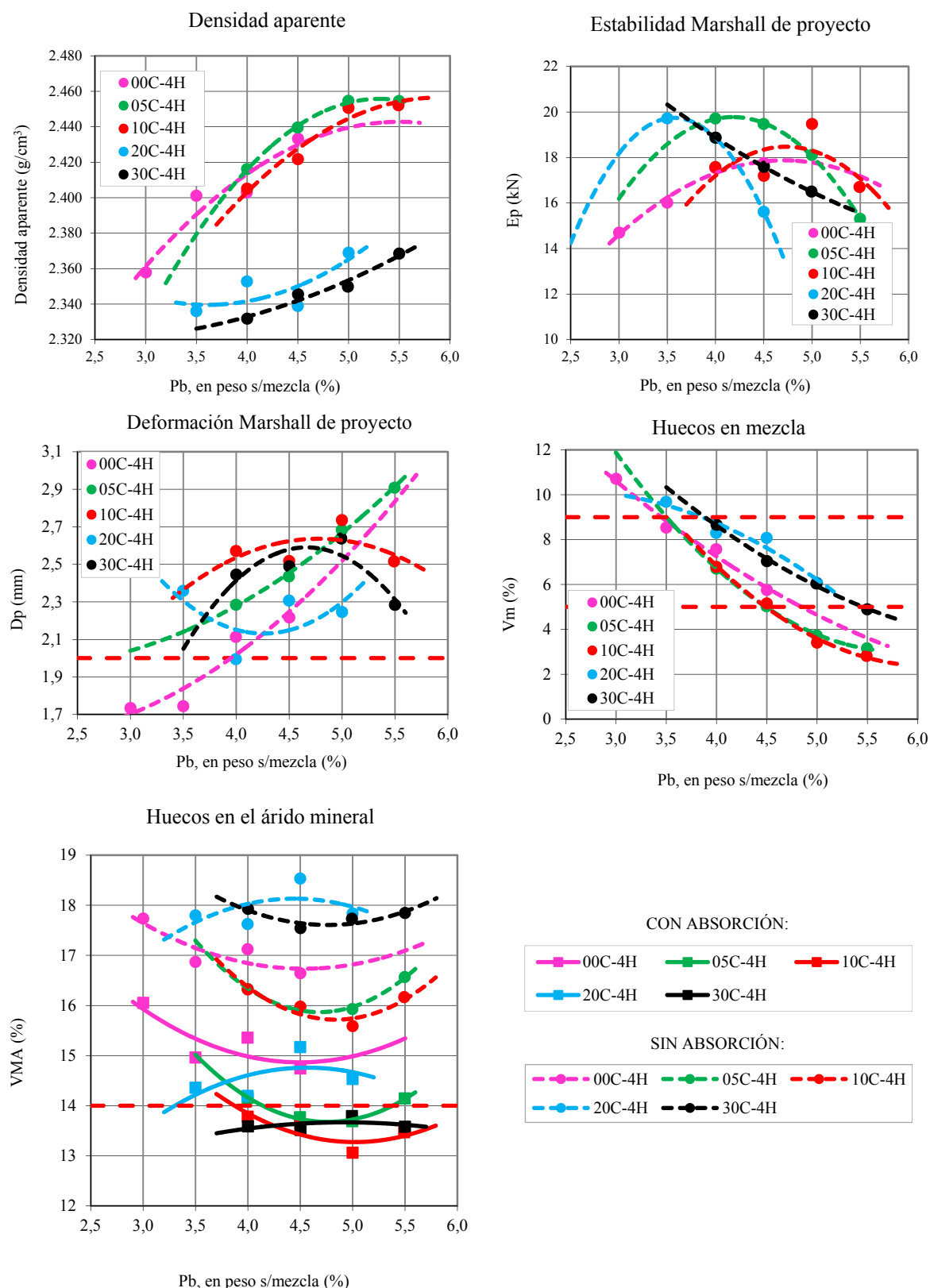


Figura 7.26.- Curvas con los parámetros del ensayo Marshall en función del contenido de ligante. Mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa.

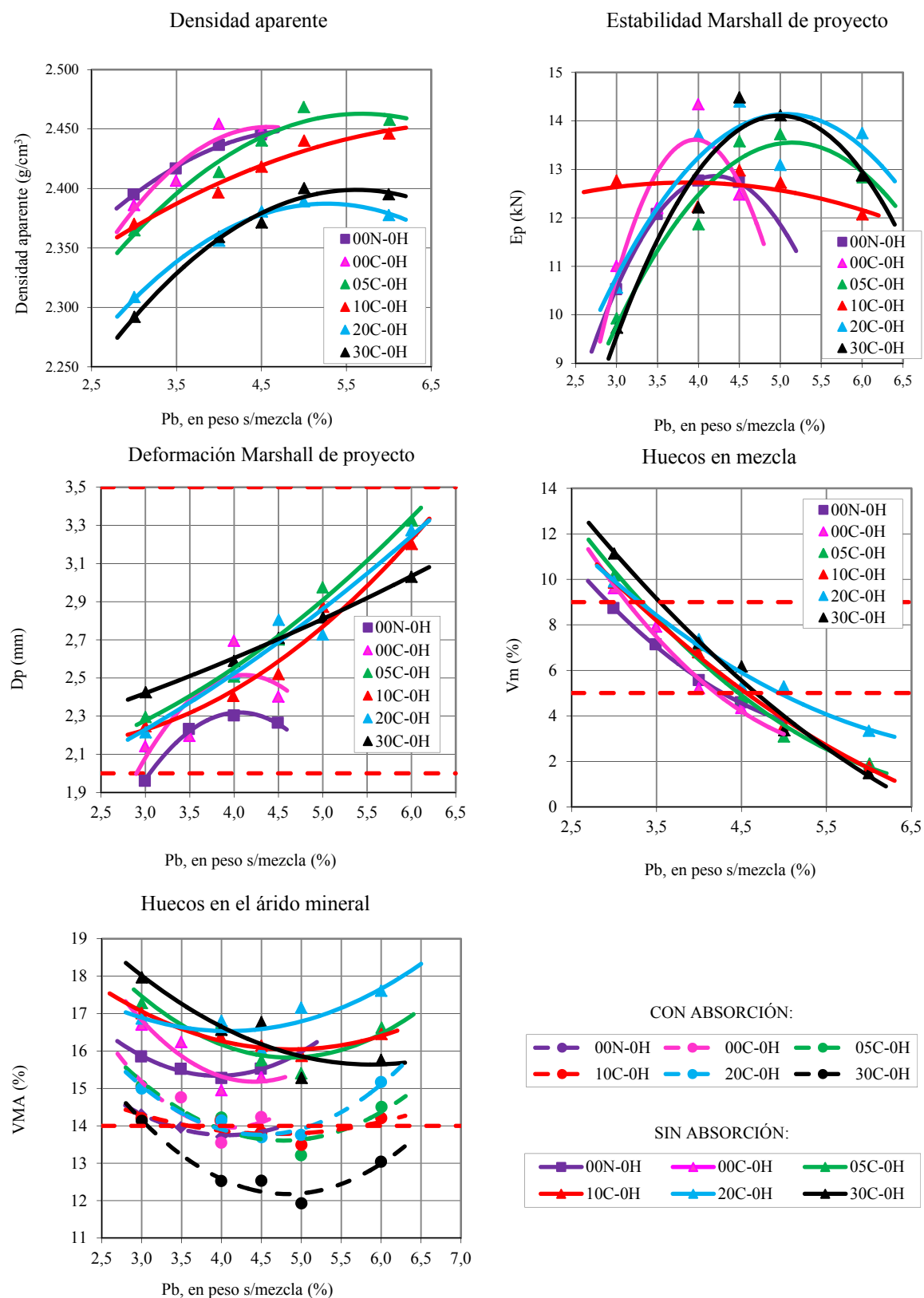


Figura 7.27.- Curvas con los parámetros del ensayo Marshall en función del contenido de ligante. Mezclas sin pretratamiento.

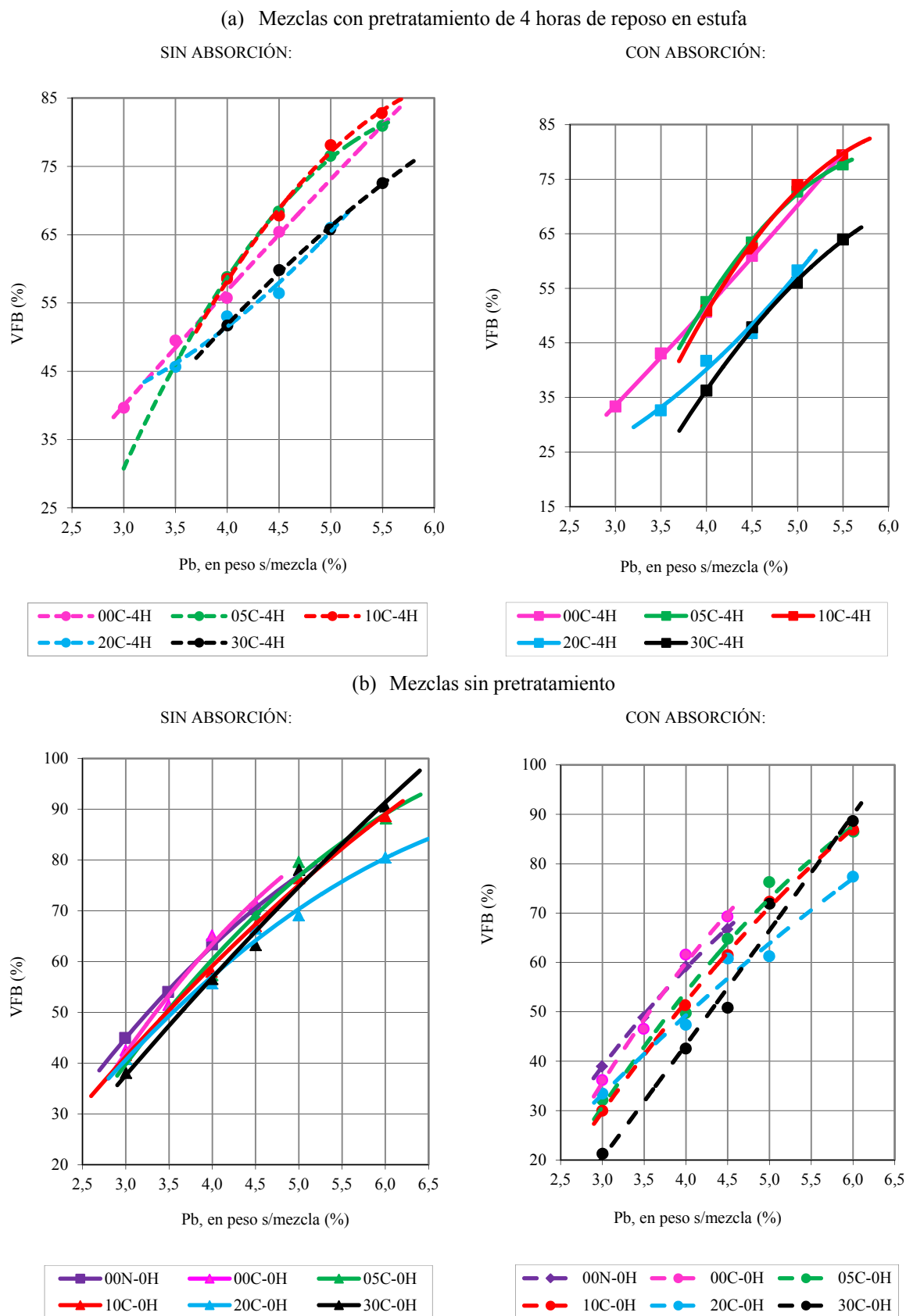
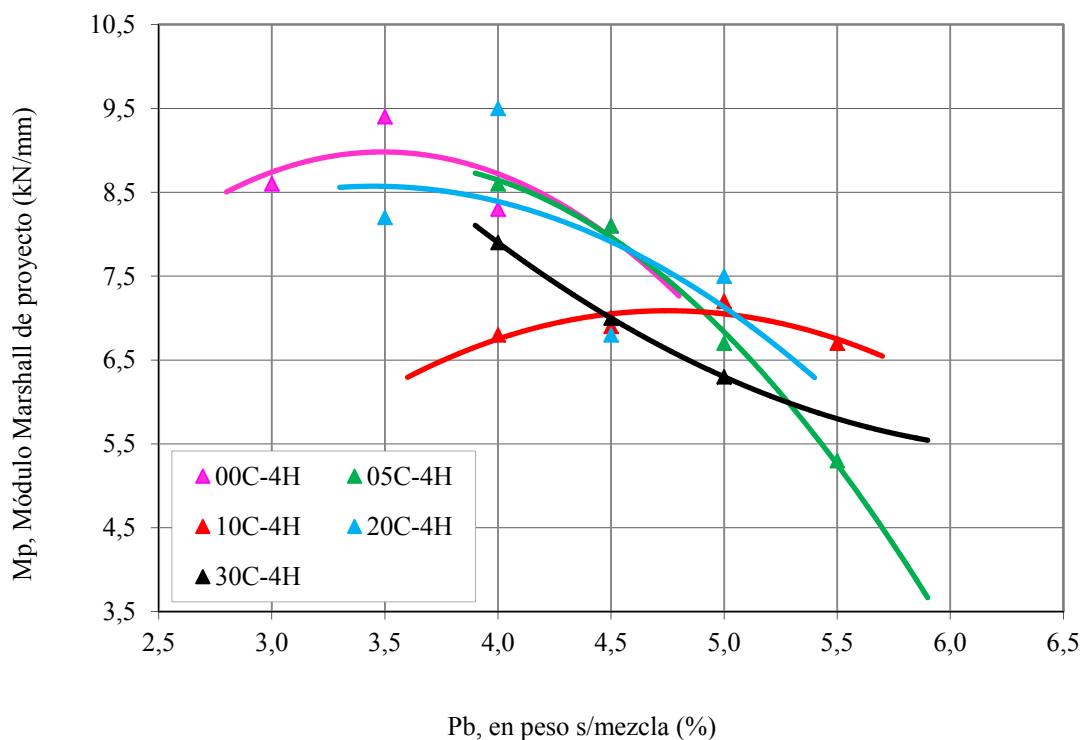


Figura 7.28.- Huecos rellenos de ligante frente a contenido de ligante: (a) Mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa y (b) Mezclas sin pretratamiento.

(a) Mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa



(b) Mezclas sin pretratamiento

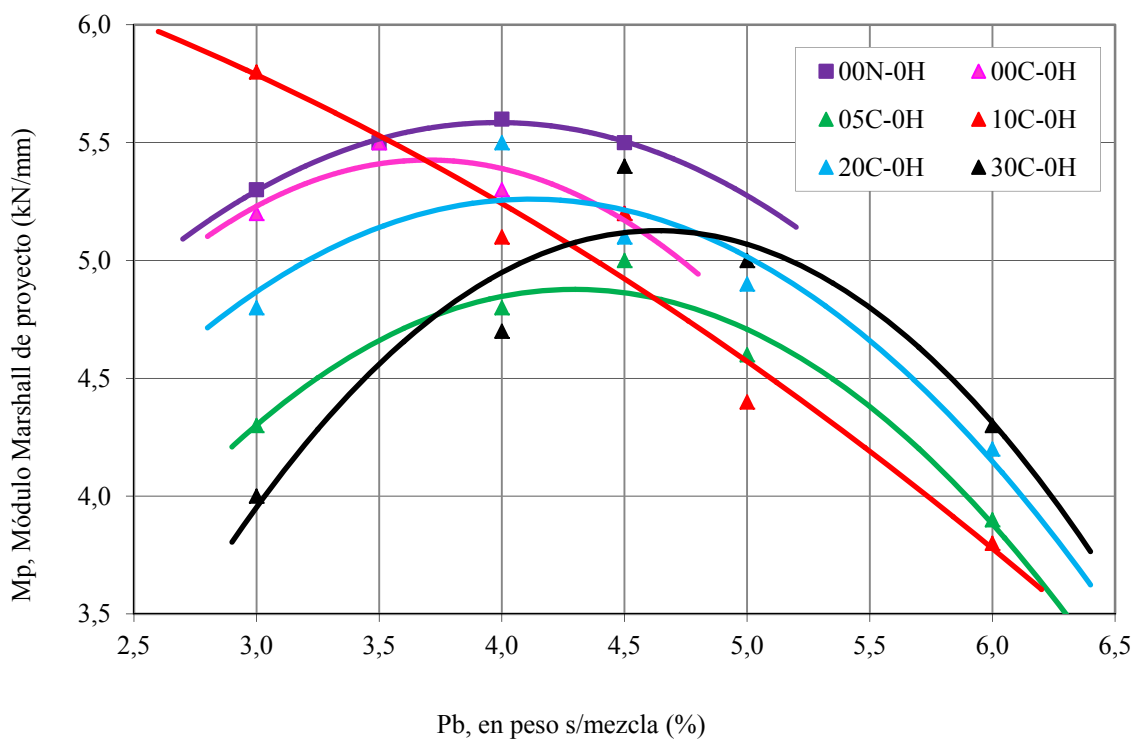


Figura 7.29.- Módulo Marshall en función del contenido de ligante: (a) Mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa y (b) Mezclas sin pretratamiento.

7.4.2.2 Contenido óptimo de ligante

Con el fin de determinar el contenido óptimo de ligante, los resultados obtenidos se han analizado teniendo en cuenta tanto las especificaciones del anterior PG-3 (Ministerio de Fomento, 2004), como las del vigente PG-3 (Ministerio de Fomento, 2008), ambas recogidas en la tabla 7.7.

Característica	Categoría de tráfico pesado			
Categoría de tráfico pesado	T00 y T0	T1 y T2	T3 y arcenes	T4
Estabilidad (kN) (*)	>15	>12,5	>10	8-12
Deformación (mm) (*)	2-3	2-3,5		2,5-3,5
Huecos en mezcla (%)	5-8	6-9	5-9	-
Huecos en áridos (%) (**)	≥ 14			

(*) Especificaciones exclusivas del antiguo PG-3.

(**) En el nuevo PG-3 solo se exige si se prevén anomalías en la fórmula de trabajo; mientras que en el antiguo es de obligado cumplimiento en cualquier caso.

Tabla 7.7.- Criterios de dosificación empleando el ensayo Marshall según el PG-3 para capas de base y mezclas bituminosas en caliente de tipo G-20 (actual AC 22 base G).

Como puede observarse en la tabla 7.7, en el antiguo PG-3 se tienen en cuenta los valores de la estabilidad, la deformación Marshall, los huecos en mezcla y los huecos en árido; mientras que en el vigente PG-3, solo se tienen en cuenta los huecos en mezcla y, en caso de que se prevean anomalías en la fórmula de trabajo, los huecos en el árido mineral.

Antes de proceder a la determinación del contenido óptimo de betún, es preciso realizar una consideración importante. Para determinar el contenido óptimo de ligante, el PG-3 indica que es preciso que VMA sea mayor o igual al 14%. Para dar cumplimiento a esta especificación se ha considerado adecuado analizar el valor de VMA y no el de VMA_{abs} . La razón fundamental es que los límites indicados en las especificaciones del PG-3 también están establecidos sin considerar la absorción. Pero además, puede verse en la figura 7.27 que si se hubiese escogido VMA_{abs} no se cumpliría en general la especificación del PG-3, ni siquiera para las probetas con un 0% de AR. Así por ejemplo, en las probetas con un 0% de AR y polvo mineral natural, habría que adoptar unos contenidos de ligante tan bajos (inferiores al 3,4%) que no se cumpliría el mínimo establecido en el PG-3 o unos tan altos (superiores al 4,7%) que se encontrarían en la rama ascendente de la curva de huecos en el árido mineral. Como es sabido, en la rama descendente a medida que se

incrementa el ligante, éste comienza a actuar como agente lubricante, de tal forma que la mezcla es más trabajable y fácil de compactar (Asphalt Institute, 1997), por lo que las partículas del árido tienen un mejor acomodo y los espacios entre el árido tienden a disminuir. En cambio, en la rama ascendente el contenido de huecos aumenta porque el árido es desplazado por el ligante, por lo que debe evitarse escoger los contenidos de ligante de esa rama, ya que puede dar lugar a mezclas que presenten roderas y exudaciones (Asphalt Institute, 1997). Además, según datos facilitados por el suministrador de los áridos naturales, en el caso del 100% de árido natural están sancionados por la práctica valores del contenido óptimo de ligante de entre un 3,7% y un 4,0 %. Por tanto, no se considera correcto analizar las especificaciones del PG-3 relativas a VMA teniendo en cuenta la absorción de ligante. De todas formas, como se indica en la tabla 7.7, el requisito del VMA actualmente solo se utiliza cuando se prevé algún tipo de anomalía en la fórmula de trabajo.

Para terminar con la disquisición sobre la conveniencia de utilizar VMA o VMA_{abs} , cabe señalar que, como es bien sabido, podría conseguirse un aumento de los huecos en el árido mineral de varias formas (Pennsylvania Department of Transportation, 2003): variación de la granulometría de la mezcla, introducción de árido fino más anguloso o reducción del porcentaje de polvo mineral. Es decir, podría modificarse la granulometría inicialmente concebida para poder satisfacer el requisito del PG-3 analizando VMA_{abs} ($VMA_{abs} \geq 14\%$) en lugar de VMA. Sin embargo, se ha preferido mantener la granulometría inicial. Como se ha visto, estas mezclas tienen un elevado contenido de huecos de aire. Incrementar los huecos en el árido mineral supondría o bien mezclas con un mayor contenido de huecos de aire (con la consiguiente disminución en la durabilidad) o bien mezclas con un mayor consumo de ligante (económica y ambientalmente poco recomendable).

También es preciso tener en cuenta que el AR que se ha utilizado en la fabricación de las mezclas bituminosas es poroso. Por ello, no solo se ha determinado el contenido de huecos en el árido mineral y de huecos rellenos de ligante. También se ha considerado fundamental analizar la variación de estos dos parámetros al tener en cuenta la absorción de ligante y determinar tanto el contenido de asfalto absorbido (P_{ba}) como el contenido de asfalto efectivo (P_{be}). En el Anexo 2 se describe la determinación de estos dos parámetros.

Tras estas consideraciones, se indican los pasos seguidos para determinar el contenido

óptimo de ligante:

- 1) Se comprueba que VMA es mayor o igual al 14% en todo el rango de contenidos de ligante ensayados. Tal y como se puede ver en las figuras 7.26 y 7.27 y en las tablas A3.1 y A3.2, este requisito se cumple para todas las probetas ensayadas.
- 2) Se identifican los rangos de contenido de ligante que se encuentran en una determinada categoría de tráfico pesado, según el valor de los huecos en mezcla (V_m).
- 3) Se considera la dotación mínima de ligante exigida por el PG-3. En el antiguo PG-3 es de un 3,5% sobre la masa total del árido incluido el polvo mineral (3,4 % sobre la masa total de la mezcla). En el vigente PG-3 se indica que la dotación mínima sobre la masa total de la mezcla será de $3,65 \times 2,65 / \rho_d$, donde ρ_d es la densidad de las partículas de árido (tablas 5.2 y 5.7). Dados los valores de las densidades, es una condición más restrictiva la indicada en el vigente PG-3, pues se obtienen valores del 3,4% para el 0%, 5% y 10% de AR y del 3,5% para el 20% y el 30% de AR. Por tanto, se toma como dotación mínima esta última, por ser la más restrictiva.
- 4) Se identifican los rangos de contenido de ligante que se encuentran en una determinada categoría de tráfico pesado, según el valor de la estabilidad Marshall de proyecto y la deformación Marshall de proyecto, siguiendo las especificaciones del antiguo PG-3, que es el que considera estos parámetros.
- 5) Como contenido óptimo de ligante se ha escogido el menor que otorgue la máxima categoría de tráfico pesado según ambos pliegos.
- 6) Se ha procurado además, en los casos en los que ha sido posible, que el contenido óptimo de ligante cumpla con la relación ponderal recomendable polvo mineral-ligante. Esta relación, según el vigente PG-3, para tráficos T00 a T2, en capa de base y zona cálida y media, debe valer 1,0.

En la tabla 7.8 se recoge el contenido de ligante óptimo (B_o), de ligante efectivo (P_{be}) y de ligante absorbido (P_{ba}). Asimismo se indican los valores de los parámetros del ensayo Marshall para el contenido óptimo de ligante determinado. Además, se incluye la categoría de tráfico pesado para la que serían aptas las mezclas fabricadas con el contenido óptimo de ligante, según las especificaciones del PG-3 vigente y del antiguo.

Parámetros	Con pretratamiento (4 horas de reposo en estufa)					Sin pretratamiento					
	00C-4H	05C-4H	10C-4H	20C-4H	30C-4H	00N-0H	00C-0H	05C-0H	10C-0H	20C-0H	30C-0H
Bo (%)	4,0	3,8	3,9	4,4	4,3	3,7	3,7	3,7	3,7	3,8	4,0
Pbe (%)	3,2	2,9	2,9	3,0	2,5	3,0	3,1	2,8	2,7	2,7	2,5
Pba (%)	0,8	1,0	1,1	1,5	1,9	0,7	0,6	0,9	1,0	1,1	1,6
ρ_b (g/cm ³)	2,413	2,403	2,397	2,348	2,338	2,456	2,430	2,407	2,394	2,354	2,358
E (kN)	18,23	20,42	17,71	17,66	18,59	13,11	14,11	12,46	13,40	13,55	13,66
Ep (kN)	17,31	19,41	16,83	16,78	17,66	12,46	13,40	11,84	12,73	12,88	12,92
D (mm)	3,58	4,20	4,79	3,68	4,70	3,93	4,64	4,80	4,44	4,64	4,28
Dp (mm)	2,02	2,22	2,51	2,14	2,54	2,28	2,46	2,46	2,36	2,46	2,64
V _m (%)	7,25	7,57	7,27	7,87	7,71	6,44	6,68	7,54	7,54	7,59	7,27
VMA (%)	16,84	16,66	16,54	18,14	17,71	15,38	15,60	16,46	16,44	16,56	16,65
VFB (%)	56,82	53,96	55,85	56,59	56,44	58,05	57,57	54,64	53,96	54,07	56,82
VMA _{abs} (%)	14,98	14,45	13,96	14,75	13,61	13,82	14,13	14,18	13,96	14,04	12,58
VFB _{abs} (%)	51,41	46,94	47,76	46,61	43,21	53,33	53,20	47,48	45,68	46,20	43,33
M (kN/mm)	5,09	4,86	3,70	4,80	3,96	3,34	3,04	2,60	3,02	2,92	3,19
Mp (kN/mm)	8,57	8,74	6,71	7,84	6,95	5,46	5,45	4,81	5,39	5,24	4,89
PG-3 antiguo	T00 a T3		T00 a T4	T00 a T3	T00 a T4	T3	T1 a T3	T3	T1 a T3	T1 a T3	T1 a T3
PG-3 vigente	T00 a T4										

Tabla 7.8.- Resultados de los parámetros del ensayo Marshall.

Puede observarse en la tabla 7.8 que según el PG-3 vigente todas las mezclas son aptas para todas las categorías de tráfico pesado (T00 a T4). En cambio, siguiendo los criterios del PG-3 antiguo, no. Se han sombreado en color gris los valores que provocan que una mezcla sea apta para un rango menos amplio de categorías de tráfico pesado según las especificaciones del antiguo PG-3. Como puede observarse, para las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, el parámetro crítico es la deformación. Al obtenerse deformaciones inferiores a los 2,5 mm, las mezclas no son aptas para categorías de tráfico pesado T4. Por tanto, aunque las mezclas fabricadas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa son aptas para categorías de tráfico pesado altas y medias, su **rigidez no las hace aptas para carreteras con la categoría de tráfico pesado más baja**, ya que podrían fisurarse rápidamente ante los esfuerzos del tráfico, como consecuencia de su escasa flexibilidad. En el caso de las mezclas fabricadas sin pretratamiento hay dos parámetros críticos: la deformación y la estabilidad. Respecto a la deformación se podría comentar lo mismo que en caso anterior: en general, las deformaciones no llegan a 2,5 mm, por lo que son excesivamente rígidas para las carreteras con la categoría de tráfico pesado más baja, es decir, la T4. En cuanto a la estabilidad, en general ni es lo suficientemente alta como para ser apta para las carreteras con la categoría de tráfico pesado más alta, ni lo suficientemente baja como para ser apta para las carreteras con la categoría de tráfico pesado T4.

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados incluidos en la tabla 7.8, se han realizado las figuras 7.30 y 7.31. En ellas se representa la variación de algunos de los parámetros evaluados en función del contenido de AR. Así, en la figura 7.30 se puede ver la variación del contenido óptimo de ligante, el contenido de ligante efectivo y la absorción de betún, con el porcentaje de AR para mezclas sin pretratamiento y mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. Además, en la figura 7.30 se han incluido los valores del contenido óptimo de ligante (“Bo(natural)”), la absorción de betún (“Pba(natural)”) y el contenido de ligante efectivo (“Pbe(natural)”) para las mezclas fabricadas con polvo mineral natural, 0% de AR y sin pretratamiento. Como puede apreciarse, a medida que **aumenta el porcentaje de AR** también **aumenta** el contenido de ligante óptimo (**Bo**) y la absorción (**Pba**); mientras que el contenido de ligante efectivo (**Pbe**) **disminuye**. Estas tendencias tienen su explicación en que la elevada porosidad del mortero de cemento adherido al AR provoca una absorción de ligante proporcional a su

porcentaje de participación en la composición de la mezcla bituminosa. Como era previsible, esto hace que para que la mezcla funcione adecuadamente se precise una mayor cantidad de ligante, es decir, un mayor contenido óptimo cuanto mayor es el porcentaje de AR. La gran porosidad del AR también provoca que cuanto mayor sea su presencia en la mezcla, mayor sea la absorción de ligante y, por tanto, menor sea el contenido de ligante efectivo (Pbe). Este resultado es acorde con lo indicado al respecto en el estado del arte. Es de interés destacar que para el 0% de AR también se produce una cierta absorción de ligante (entre el 0,6% y el 0,8%). Por tanto, puede afirmarse que el árido natural también absorbe ligante, aunque en menor proporción que el reciclado. Cabe señalar respecto al valor de Pba, que la normativa española no limita su valor. En cambio, en otros países este valor está limitado. Por ejemplo en Corea del Sur se admite un máximo de un 3,0% (Cho et al., 2011), valor con el que cumplen todas las mezclas ensayadas.

Además puede verse como el **contenido de ligante óptimo (Bo)** es **superior** en el caso de que se aplique **pretratamiento** a la mezcla. En cambio, el **contenido de ligante efectivo (Pbe)** es **ligeramente superior o similar** para las mezclas sin pretratamiento. Esto es así debido a la mayor absorción de ligante que, como puede verse, se produce cuando se deja reposar la mezcla en estufa. Así, para poder satisfacer la absorción de ligante por parte del AR, en el caso de las mezclas que se han dejado reposar en estufa, se requiere una mayor cantidad de ligante óptimo. Sin embargo, como era de esperar, aunque el contenido de ligante óptimo es mayor en las mezclas con pretratamiento también lo es la absorción, por lo que finalmente los contenidos de ligante efectivo obtenidos son muy parecidos en ambos casos.

En la figura 7.30 también puede apreciarse que en las mezclas con un 0% de AR en las que se no se ha aplicado pretratamiento, el contenido óptimo de ligante obtenido es el mismo tanto si se utiliza polvo mineral natural como si se utiliza polvo mineral de cemento. En cambio, la absorción es ligeramente superior cuando se utiliza polvo mineral natural y, por tanto, el contenido de ligante efectivo es ligeramente inferior cuando se utiliza polvo mineral natural que cuando se utiliza polvo mineral de cemento.

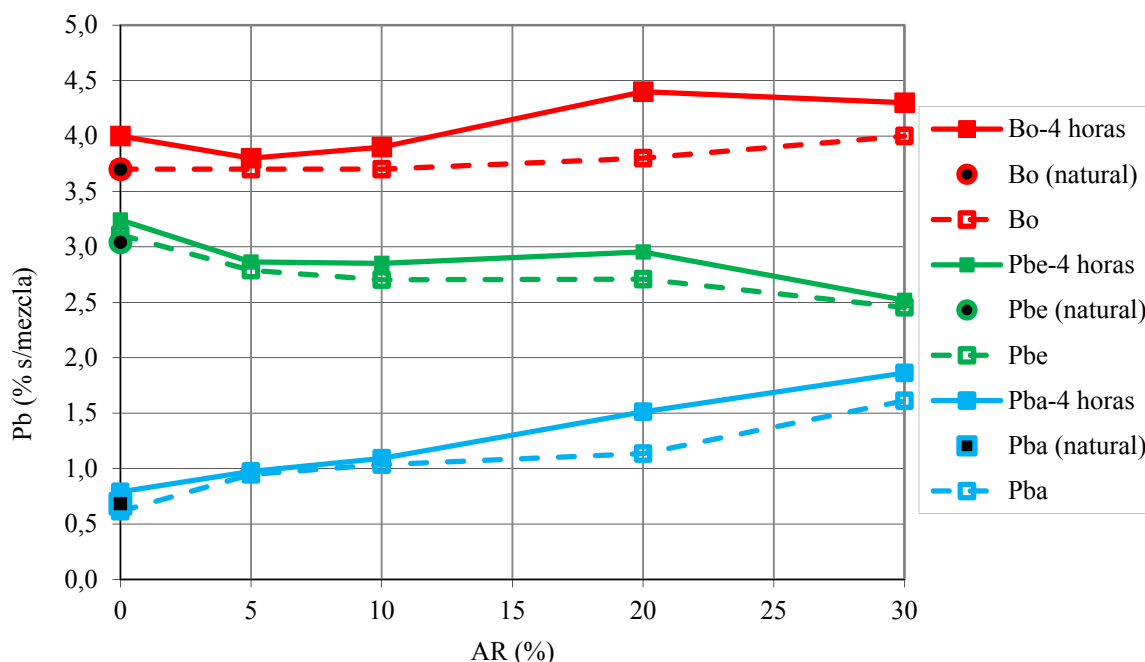


Figura 7.30.- Contenido de ligante óptimo, contenido de ligante efectivo y absorción de ligante en función del porcentaje de AR.

En la figura 7.31 se representa la densidad aparente frente al contenido de AR. Al igual que se veía en las figuras 7.26 y 7.27, se puede apreciar como, en general, la densidad aparente disminuye con el incremento en el porcentaje de AR, ya que este último árido es menos denso que el árido natural. La única excepción a esta tendencia la constituye la densidad aparente de la mezcla sin pretratamiento fabricada con un 30% de AR, que es ligeramente superior a la de la mezcla fabricada con un 20% de AR. Esta excepción tiene su explicación: entre los porcentajes del 0% al 20% de AR, únicamente se produce un aumento del 0,1% en el contenido óptimo de ligante; mientras que del 20% al 30% de AR se produce un aumento de un 0,2%. Este incremento del 0,2% de ligante favorecería la compactación. Así, el decremento de volumen de la probeta provocaría un aumento en la densidad que compensaría la reducción provocada por el mayor porcentaje de AR.

Si se utiliza polvo mineral de cemento se puede ver que los valores de las densidades aparentes son muy parecidos en ambos casos, aunque en general son ligeramente inferiores en el caso de la mezcla que se ha dejado reposar en estufa. Esta ligera diferencia se debe fundamentalmente al menor volumen de la probeta de las mezclas sin pretratar, pues como se ha visto presentan un contenido de ligante efectivo ligeramente superior, lo que facilita

su compactación. Con polvo mineral natural (“Sin pretratamiento (natural)”), la densidad aparente es mayor que si se utiliza polvo mineral de cemento. En este caso, la diferencia de densidades puede atribuirse a las dispersiones propias de este ensayo.

En la figura 7.31 también se representa la variación de la Estabilidad Marshall de proyecto en función del contenido de AR. Como se puede ver, en el caso de las mezclas con pretratamiento, con excepción del 5% de AR, existe una tendencia inicial decreciente y posteriormente creciente de la estabilidad al ir aumentando el contenido de AR. La excepción que se da con el 5% de AR, posiblemente sea debida a las dispersiones propias de los ARs. Además, esta tendencia es más acusada en las mezclas sometidas al **pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa**, lo cual evidencia la **mayor sensibilidad al contenido de AR** de estas mezclas. Cabe señalar así mismo que los valores de estabilidad obtenidos para mezclas con pretratamiento son muy elevados. Para todos los porcentajes de AR son superiores a los 15 kN exigidos por el PG-3 para la categoría de tráfico pesado T00.

Es interesante comparar los resultados de las series 00N-0H (0% AR, polvo mineral natural) y 00C-0H (0% AR y polvo mineral cemento). Puede verse que, tal y como se vio en la figura 7.27, con el polvo mineral de cemento se obtienen mayores valores de estabilidad que con el polvo mineral natural (“Sin pretratamiento (natural)”). Así, teniendo en cuenta las especificaciones del antiguo PG-3, la serie 00C-0H es válida para categorías de tráfico pesado superiores a las de la 00N-0H. Como se ha comentado anteriormente, en la presente investigación el fin de utilizar cemento como polvo mineral es el de mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con AR, no mejorar la resistencia de las mismas, por lo que este resultado se toma como un posible beneficio adicional.

Al igual que en las figuras 7.26 y 7.27, puede verse que los valores de estabilidad de mezclas que se han dejado reposar 4 horas en estufa son notablemente superiores a los obtenidos con las mezclas sin pretratamiento. Además esta observación se cumple para todo el rango de contenidos de ligante ensayados. Por tanto, como ya se comentó anteriormente, se puede inferir que dejar la mezcla en la estufa durante 4 horas a 170°C antes de su compactación, con el fin de que el AR absorba mejor el ligante, aumenta la estabilidad de la mezcla. La diferencia entre estabildades es incluso apreciable en el caso

del porcentaje de sustitución del 0%. Además, es importante observar que, en las mezclas con reposo en estufa, por un lado, el contenido óptimo de ligante es algo superior al de las mezclas sin pretratamiento y, por otro lado, la estabilidad es muy superior a la de estas. Esto indica que con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa se logra un mayor rendimiento del ligante empleado. La absorción del mismo por parte de los poros del AR se traduce en un aumento de la resistencia de la mezcla bituminosa así fabricada. Como se indicó anteriormente, el fin último de dejar 4 horas en estufa la mezcla es el de mejorar la sensibilidad al agua, no el de aumentar la resistencia, por lo que éste podría ser un beneficio adicional al esperado. En este sentido, las ideas anteriormente indicadas permiten deducir que utilizar polvo mineral de cemento gris y dejar 4 horas de reposo en estufa provocan un mismo beneficio añadido: mejorar la estabilidad de la mezcla. Sin embargo, conviene recordar que, como ya se comentó anteriormente, una estabilidad elevada no sería beneficiosa si fuese acompañada por deformaciones excesivamente bajas, ya que podría dar lugar a mezclas muy rígidas, con facilidad para fisurarse ante los esfuerzos de tráfico.

Por ello es fundamental el análisis de la Deformación Marshall de proyecto en función del contenido de AR. Por un lado, en general, se aprecia un aumento de la deformación con el contenido de AR. Por otro lado, puede verse que en la mayor parte de los casos las mezclas bituminosas que se han dejado reposar en estufa presentan deformaciones inferiores a las que presentan las mezclas sin pretratamiento. Como ya se comentó anteriormente tanto las deformaciones de las mezclas con pretratamiento como las deformaciones de las mezclas sin pretratamiento se encuentran dentro del rango habitual, haciendo que las **mezclas con AR no sean excesivamente rígidas, salvo para la categoría de tráfico pesado más baja**.

También resulta de interés analizar el Módulo Marshall de proyecto frente al contenido de AR. El PG-4, Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de conservación de carreteras (Ministerio de Fomento, 2001), indica en su artículo relativo a “Reciclado en caliente de capas bituminosas”, que el módulo Marshall de la mezcla bituminosa en caliente reciclada será inferior a 8 kN/mm. Con valores superiores podrían obtenerse mezclas excesivamente rígidas. Las mezclas fabricadas con RAP pueden llegar a ser muy rígidas, puesto que en el RAP el betún está envejecido y muy duro. Por ello se limita el Módulo Marshall a 8 kN/mm, para evitar que se produzcan grietas en mezclas con altos esfuerzos y bajas deformaciones.

Aunque las mezclas fabricadas con RAP no tienen por qué comportarse igual que las mezclas fabricadas con AR, se ha tomado el límite de 8 kN/mm a efectos de estimación de su comportamiento. Como puede verse en la figura 7.31, los módulos de las mezclas sin pretratamiento, son siempre inferiores a 8 kN/mm. Los valores obtenidos para las series 00N-0H y 00C-0H son similares, lo que indica que la presencia de polvo mineral de cemento o polvo mineral natural (“Sin pretratamiento (natural)”) no es significativa en cuanto a favorecer o perjudicar la rigidez de la mezcla. Además, con 0% de AR se obtienen los mayores valores del módulo Marshall, por lo que las mezclas sin AR presentan una mayor rigidez.

Para las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, a partir de porcentajes del 10% de AR, la mezcla presenta módulos inferiores a 8 kN; mientras que para el 0% y el 5% la mezcla presenta valores superiores, por lo que previsiblemente será muy rígida. Por tanto, se confirma que la absorción de ligante rigidiza la mezcla.

En la figura 7.31 también se analiza la variación del contenido de huecos en mezcla y del contenido de huecos en el árido mineral en función del porcentaje de AR utilizado en la fabricación de las mezclas bituminosas. Este análisis se ha realizado tanto considerando la absorción de ligante en los cálculos como sin tenerla en cuenta.

Respecto al contenido de huecos en el árido mineral, puede verse que, de forma general, VMA aumenta ligeramente al aumentar el contenido de AR, al igual que lo hace el contenido de ligante óptimo. Sin embargo, VMA_{abs} disminuye ligeramente con el contenido de AR, lo cual pone de manifiesto la mayor absorción de ligante que se produce al ir aumentando el porcentaje de AR en la mezcla y, por tanto, el menor contenido de ligante efectivo. Además, si se tiene en cuenta la absorción de ligante puede verse como el contenido de huecos en el árido mineral disminuye notablemente respecto al valor obtenido sin considerar la absorción de ligante. Esto indica que no tener en cuenta el ligante absorbido en los cálculos sobreestima el contenido de huecos en el árido mineral.

Como puede apreciarse VMA es mayor al 14% en todos los casos. Por tanto, según los requisitos del PG-3, las mezclas tendrían espacio suficiente para dar cabida al ligante, sin que su expansión debida a elevadas temperaturas provoque problemas por exudación. Sin embargo VMA_{abs} es ligeramente inferior a ese límite del 14% en algunos casos. El análisis de los huecos en mezcla y huecos rellenos de ligante podrá ayudar a esclarecer si se podría

dar algún problema en las mezclas derivado de un bajo contenido de huecos en el árido mineral.

Los huecos en mezcla presentan una tendencia general a mantenerse constantes o a aumentar ligeramente con el contenido de AR. Este ligero aumento de V_m se aprecia de forma clara en el caso de los porcentajes de 0%, 5% y 10% de AR para mezclas sin pretratamiento. Para estos tres porcentajes el contenido óptimo de ligante es de un 3,7%, es decir, los tres porcentajes de AR presentan el mismo contenido óptimo de ligante. Sin embargo, V_m para el 0% de AR es notablemente inferior que para el 10%. Todo ello hace pensar que la presencia de AR en la mezcla podría dificultar ligeramente la compactación, debido a la mayor rugosidad del mortero de cemento adherido, dando lugar a mezclas con un mayor contenido de huecos en mezcla.

Como puede apreciarse, V_m se encuentra dentro del rango de valores admitidos por el PG-3 para todas las categorías de tráfico pesado tanto para las mezclas sin pretratamiento como para las mezclas con pretratamiento. Por tanto, se confirma que con el contenido óptimo de ligante no habría problemas ni de durabilidad, ni para permitir la expansión del betún, ni para asumir la post compactación debida al tráfico durante la vida de servicio e incluso una variación en el contenido de ligante durante la producción de las mezclas en planta.

Finalmente en la figura 7.31 se representa el contenido de huecos rellenos con ligante (V_{FB} y $V_{FB_{abs}}$) frente al porcentaje de AR. Puede verse que para las mezclas sin pretratamiento V_{FB} va disminuyendo con el contenido de AR, después se hace constante y finalmente aumenta. Para mezclas con pretratamiento el tramo constante no se produce. Esto es debido a las propias leyes de variación de los huecos en mezcla y el contenido óptimo de ligante vistas anteriormente. En cambio, si se tiene en cuenta la absorción de ligante el contenido de huecos rellenos de ligante disminuye de forma relativamente acusada con el porcentaje de AR, lo cual refleja, como ya se ha comentado anteriormente, el carácter absorbente del AR. Además, como era previsible a la vista de las figuras 7.26 y 7.27, $V_{FB_{abs}}$ es inferior para mezclas con pretratamiento, lo cual refleja la efectividad del pretratamiento aplicado para permitir una mayor absorción de ligante por parte del AR.

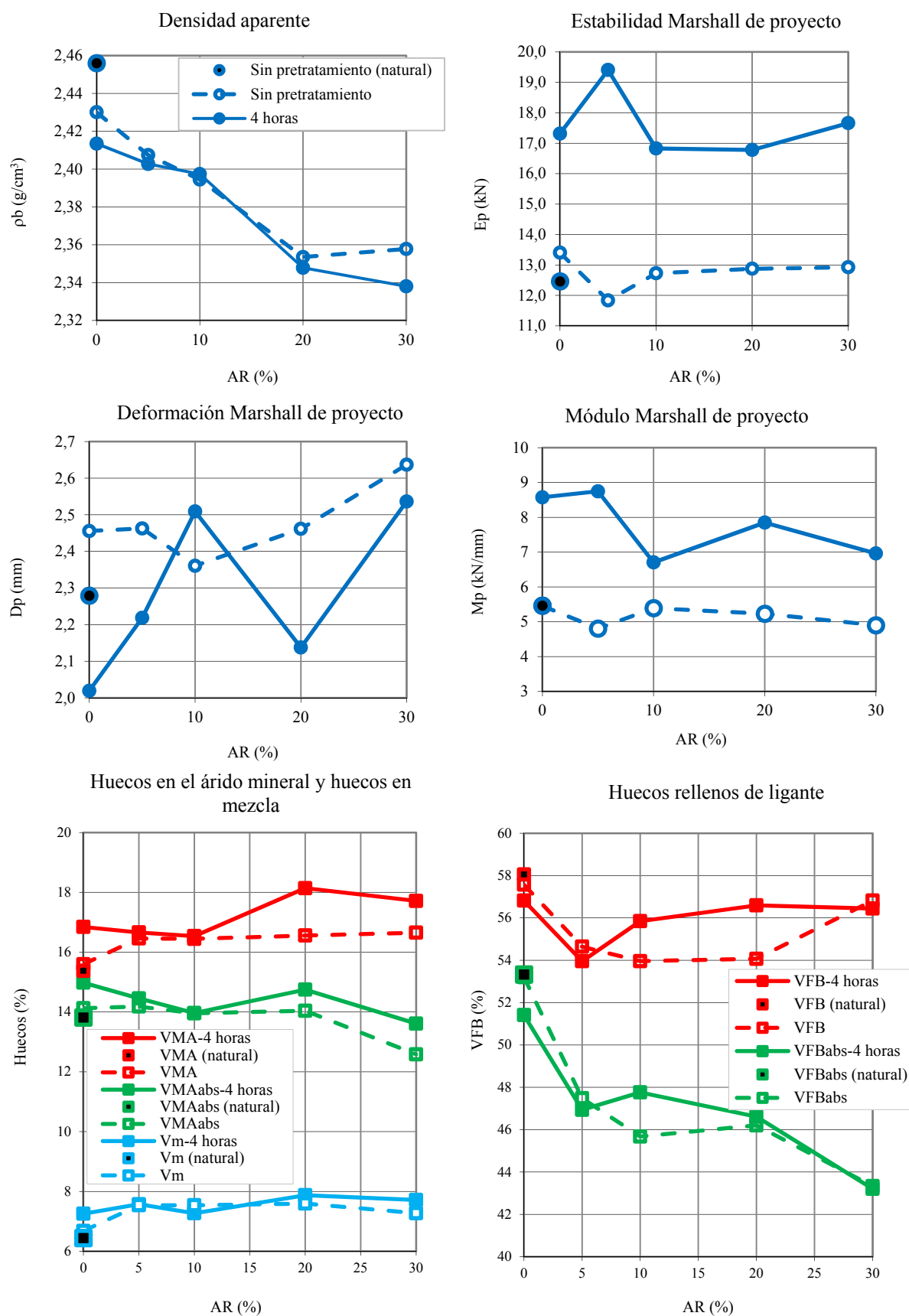


Figura 7.31.- Parámetros Marshall con el contenido óptimo de ligante en función del porcentaje de AR.

7.4.3 Análisis de la sensibilidad al agua de las mezclas elaboradas con el porcentaje óptimo de ligante.

En este apartado se analiza la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas anteriormente dosificadas. Es decir, las mezclas bituminosas fabricadas con el contenido óptimo de ligante determinado en el apartado 7.4.2.2. Para ello se han ensayado a tracción indirecta tras inmersión 11 series de, como mínimo, 6 probetas cada una y otras 2 para determinar la densidad máxima y la densidad aparente (104 probetas en total). Las principales características de las series ensayadas aparecen reflejadas en la tabla 7.9.

Serie		ITSR (%)	ITSd (MPa)	ITSw (MPa)	δ_s (%)	δ_w (%)	VMA (%)	VMA _{abs} (%)	Vm (%)	Categoría
4 horas de reposo en estufa	00C-4H	82,80	2,427	2,010	1,25	1,49	16,71	15,03	7,12	T00 a T4
	05C-4H	102,49	1,927	1,975	1,72	1,34	16,97	14,96	7,96	
	10C-4H	96,52	2,315	2,234	1,45	1,59	17,65	14,74	8,44	T1 a T4
	20C-4H	94,22	1,837	1,730	1,32	1,35	17,82	14,70	7,55	T00 a T4
	30C-4H	98,75	1,702	1,680	1,60	1,53	17,66	13,74	7,69	
Sin pretratamiento	00N-0H	70,94	1,097	0,778	-	-	16,45	14,90	7,64	T00a T4
	00C-0H	75,31	2,174	1,637	1,74	1,88	16,65	14,58	7,76	T1a T4
	05C-0H	76,37	1,923	1,469	1,50	1,69	16,13	14,63	7,33	T00a T4
	10C-0H	80,15	1,885	1,511	1,96	1,78	17,26	14,67	8,53	T1a T4
	20C-0H	78,50	1,692	1,328	1,57	1,88	17,47	14,13	8,59	
	30C-0H	75,23	1,215	0,914	1,62	1,88	15,66	11,72	6,19	T00 a T4

Tabla 7.9.- Resultados del ensayo de tracción indirecta tras inmersión.

Además, en la tabla 7.9 se adjuntan los resultados (ITSR, ITSw, ITSd, δ_w y δ_s) obtenidos para las distintas series estudiadas mediante el ensayo de tracción indirecta tras inmersión. También se incluyen los huecos en mezcla y los huecos en el árido mineral (Vm, VMA y VMA_{abs}). Además, al igual que en el apartado 7.4.2.2, también se indica la categoría de tráfico pesado para el cual son aptas las mezclas dosificadas con el contenido óptimo de ligante considerando exclusivamente el análisis de Vm y VMA.

Tal y como puede verse en la tabla 7.9 la totalidad de las mezclas a las que se les ha aplicado el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa cumplen con los requisitos exigidos por el PG-3 respecto a la sensibilidad al agua para capas de base (ITSR \geq 80%). Incluso las mezclas con porcentajes de AR del 5% al 30% cumplirían para capas de rodadura (ITSR \geq 85%). Además, teniendo en cuenta exclusivamente el contenido de

huecos en mezcla y de huecos en el árido mineral, todas ellas son aptas para categorías de tráfico pesado elevadas: a partir de T1 la que presenta un 10% de AR y a partir de T00 las que presentan porcentajes de 0%, 5%, 20% y 30% de AR.

Sin embargo, en el caso de las mezclas sin pretratamiento, solo la que presenta un 10% de AR cumple con los requisitos de resistencia conservada a tracción indirecta del PG-3 para capas de base. Además, en ese caso se han obtenido valores muy próximos al límite exigido por el PG-3. También cabe destacar que la mezcla bituminosa sin pretratamiento, fabricada exclusivamente con árido virgen y con el contenido óptimo de ligante, no cumple con la resistencia conservada a tracción indirecta tras inmersión. Esto es así tanto cuando se utiliza el polvo mineral procedente del propio árido natural (00N-0H) como cuando se utiliza el polvo mineral de cemento (00C-0H). Por tanto, ni el árido natural ni el reciclado presentan una buena sensibilidad al agua. Eso sí, ésta mejora en el segundo caso, lo cual confirma que el polvo mineral de cemento mejora la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas.

También es importante señalar que estos resultados confirman los resultados del estudio de afinidad árido-ligante: ni el árido natural escogido ni tampoco el AR presentan buenos valores de sensibilidad al agua. Es preciso en este punto recalcar, como ya se comentó en el capítulo 5, que se ha escogido este árido natural no por su buena adhesividad con el betún, si no por su buena resistencia a la fragmentación. Se ha priorizado la resistencia a la fragmentación del árido natural frente a la buena adhesividad árido-betún del mismo. Así se estudia el nivel pésimo de sensibilidad al agua, garantizando de esta forma, que la mezcla no dará problemas de resistencia a la acción del agua. Si bien es cierto que se está favoreciendo la resistencia de la mezcla, ya que se utiliza un árido natural de elevada resistencia a la fragmentación.

Resulta de interés comparar los valores de ITSr obtenidos para las probetas sin pretratamiento fabricadas con polvo mineral de cemento y porcentajes de AR del 0%, 5% y 10%, puesto que en esos tres casos el contenido de ligante empleado fue el mismo: un 3,7%. Por tanto, el único factor variable en el análisis de la sensibilidad al agua es el contenido de AR. Puede verse como el incremento del porcentaje de AR mejora ligeramente la sensibilidad al agua: se pasa de un 75,31% para el 0% a un 80,15% para el 10%. De esta observación puede deducirse que la sensibilidad al agua de las mezclas

fabricadas solamente con el árido natural seleccionado es incluso peor que la de las mezclas fabricadas con árido natural y un bajo porcentaje de AR.

Por otro lado, se han llevado a un gráfico los valores de resistencia a tracción indirecta y de resistencia conservada a tracción indirecta tras inmersión en función del contenido de AR. Así, se ha realizado en la figura 7.32 una representación conjunta de los valores obtenidos para las mezclas a las que se les ha aplicado el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa y para las mezclas sin pretratamiento, para poder comparar los resultados.

Comparando los valores de huecos en mezcla y huecos en el árido mineral calculados a partir de las líneas de tendencia de los gráficos del ensayo Marshall (tabla 7.8) con los valores obtenidos en probetas reales (tabla 7.9) puede apreciarse la existencia de ciertas diferencias, que no siguen una tendencia definida. Así, en ocasiones los valores estimados son superiores a los reales y viceversa.

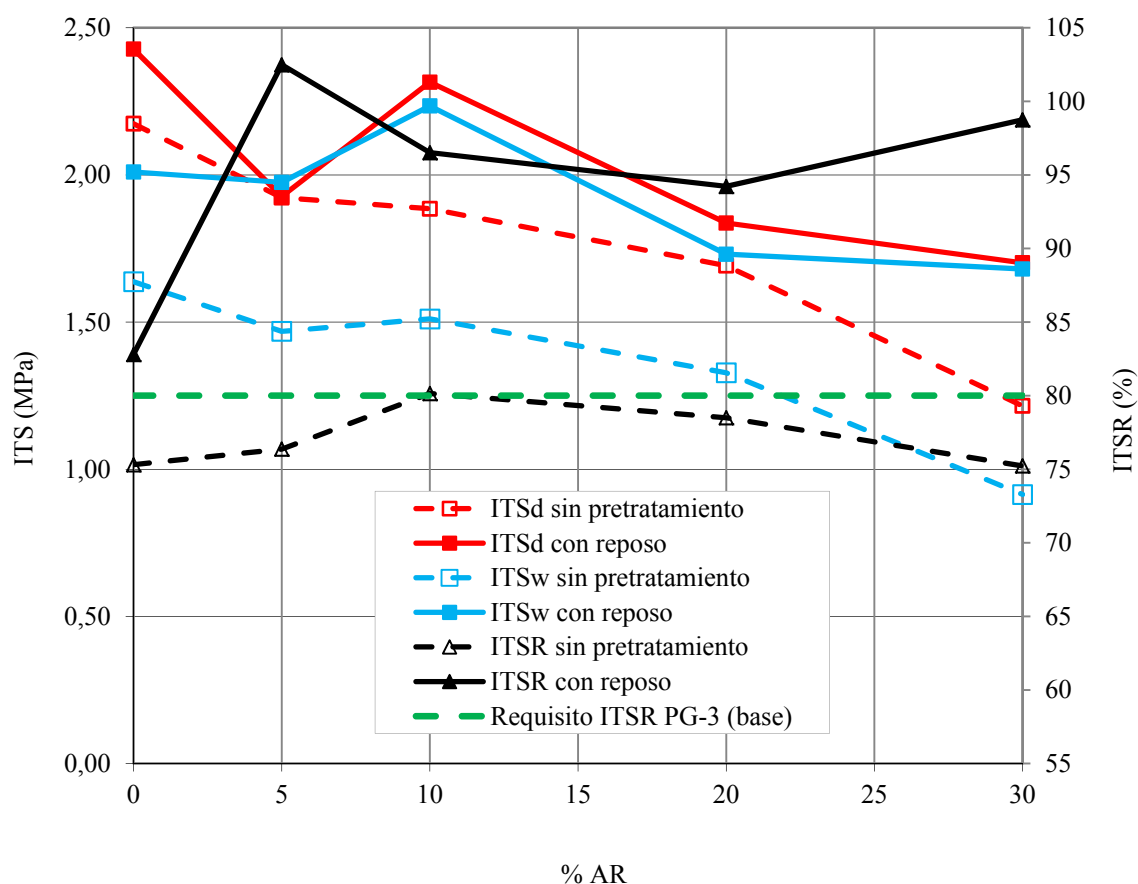


Figura 7.32.- Resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo y resistencia conservada para probetas dosificadas con los óptimos Marshall.

Del análisis de la figura 7.32 se puede concluir que la resistencia conservada a tracción indirecta es muy superior en el caso de las mezclas fabricadas aplicando el pretratamiento, con lo que puede afirmarse la idoneidad del reposo de 4 horas en estufa para mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente fabricadas con AR procedente de RCD de tipo hormigón. Esta mejora viene dada fundamentalmente por el **aumento de la resistencia en húmedo de las mezclas fabricadas con el pretratamiento de 4 horas de reposo** en estufa frente a las mezclas sin pretratamiento. Es preciso señalar que se había visto en el apartado 7.3.3 que en las mezclas con pretratamiento de 4 horas se producía una disminución de la resistencia a tracción indirecta en seco respecto a las mezclas sin pretratamiento. Estos resultados (figura 7.32) ponen de manifiesto que esto no es así: aunque puede haber excepciones, en general, con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa aumentan las resistencias, tanto en seco como en húmedo.

También puede observarse que al aplicar el pretratamiento los valores de ITSR son superiores cuando participa AR en la composición de la mezcla. Así, para el 0% de AR se obtienen valores próximos al 85%, mientras que para los porcentajes desde el 5% hasta el 30% se obtienen valores de ITSR superiores al 90% en todos los casos. Por tanto, el **pretratamiento es especialmente efectivo cuando interviene AR**, ya que es **más absorbente que el árido natural**.

Por otro lado, puede apreciarse en la figura 7.32 que los valores de la **resistencia a tracción indirecta** en seco y en húmedo presentan una tendencia a **disminuir**, de forma general, **a medida que aumenta el porcentaje de participación del AR** en la mezcla. Esto es debido a la propia naturaleza del AR, de menor resistencia a la fragmentación que el natural.

Finalmente resulta de interés recalcar que los valores de las resistencias a tracción indirecta en seco y en húmedo son superiores en el caso de que se haya aplicado pretratamiento. Esta diferencia es notablemente más acusada en las resistencias en húmedo que en las resistencias en seco. Como se ha visto, una elevada resistencia acompañada de pequeñas deformaciones puede dar lugar a mezclas excesivamente rígidas.

Por ello, se ha estimado oportuno representar en un gráfico (figura 7.33) la deformación vertical de rotura frente a la resistencia a tracción indirecta tanto para las mezclas sin pretratamiento como para las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa.

Así podrá determinarse si la aplicación del pretratamiento produce mezclas excesivamente rígidas en comparación con las que no han sido sometidas a pretratamiento. Como puede observarse el rango de variación de las deformaciones no es muy amplio (entre 1,25% y 1,96%). Por ello, aunque las mezclas con pretratamiento presentan deformaciones algo inferiores a las mezclas sin pretratamiento, no tienen por qué ser excesivamente rígidas.

En cambio, sí se aprecia que las diferencias entre las resistencias en seco y en húmedo son más acusadas en el caso de las mezclas sin pretratamiento. Es decir, el pretratamiento demuestra su efectividad a la hora de aumentar la resistencia en húmedo de la probeta y, por tanto, a la hora de mejorar la sensibilidad al agua de la mezcla.

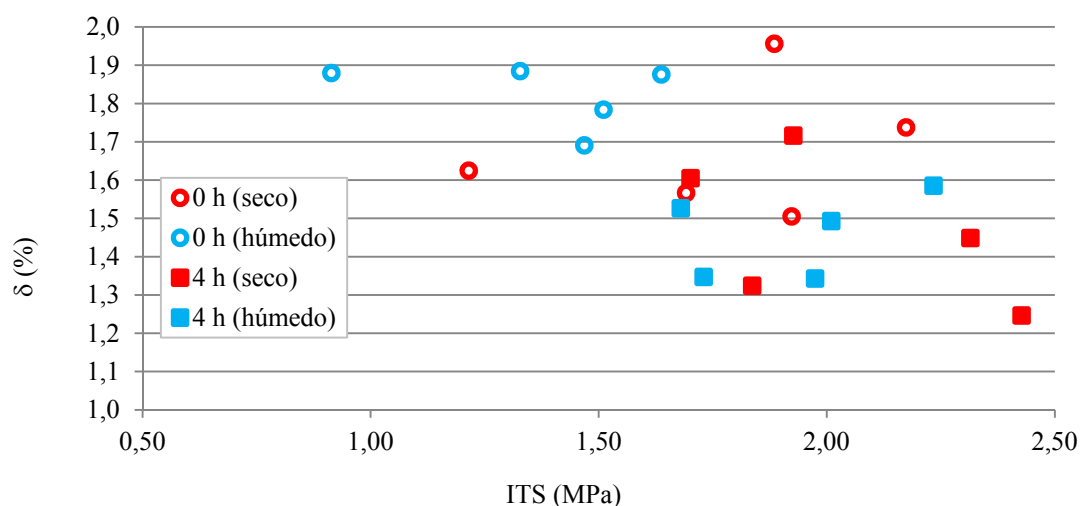


Figura 7.33.- Deformación vertical de rotura frente a resistencia a tracción indirecta para las mezclas fabricadas sin pretratamiento y con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. Contenido óptimo de ligante.

Para analizar si los resultados de la tabla 7.9 y las figuras 7.32 y 7.33 son estadísticamente significativos, se ha llevado a cabo la realización de tres análisis ANOVA. El primero de tres factores (tabla 7.10), el segundo de dos factores (tabla 7.11) y el tercero de tres factores (tabla 7.12). En el primer análisis la variable independiente es la resistencia a tracción indirecta (ITS) obtenida en el ensayo de tracción indirecta tras inmersión. Los tres factores son: porcentaje de AR (0%, 5%, 10%, 20% y 30%), estado (seco y húmedo) y pretratamiento aplicado (4 horas de reposo y sin pretratamiento). El estado y el pretratamiento aplicado son variables cualitativas mientras que la resistencia a tracción indirecta y el porcentaje de AR son variables cuantitativas. Se ha realizado el análisis con interacción de los factores dos a dos. En el segundo análisis la variable independiente es la

resistencia conservada a tracción indirecta (ITSR). Los dos factores son: porcentaje de AR (0%, 5%, 10%, 20% y 30%) y pretratamiento aplicado (4 horas de reposo y sin pretratamiento). El pretratamiento aplicado es una variable cualitativa mientras que la resistencia conservada a tracción indirecta y el porcentaje de AR son variables cuantitativas. En el tercer análisis la variable independiente es la deformación vertical de rotura (δ). Los tres factores son los mismos que los del primer ANOVA.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: estado	0,34	1	12,59	0,34	72,55	0,001
B: % de AR	1,21	4	44,92	0,30	64,7	0,0007
C: pretratamiento	0,84	1	30,93	0,84	178,2	0,0002
Interacciones						
AB	0,06	4	2,28	0,02	3,29	0,1378
AC	0,11	1	3,89	0,11	22,44	0,0091
BC	0,13	4	4,69	0,03	6,75	0,0457
Residuos	0,02	4	0,69	0,00		
Total (corregido)	2,70	19	100,00			

Tabla 7.10.- ANOVA de tres factores para el análisis de la resistencia a tracción indirecta.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: % de AR	133,11	4	12,84	33,28	1,24	0,4198
B: pretratamiento	796,02	1	76,80	796,02	29,67	0,0055
Residuos	107,30	4	10,35	26,82		
Total (corregido)	1.036,43	9	100,00			

Tabla 7.11.- ANOVA de dos factores para el análisis de la resistencia conservada.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: estado	231,2	1	2,82	231,20	0,96	0,346
B: % de AR	739,7	4	9,02	184,93	0,77	0,556
C: pretratamiento	4.089,8	1	49,86	4.089,80	16,92	0,001
Residuos	3.141,5	13	38,30	2,95		
Total (corregido)	8.202,2	19	100,00			

Tabla 7.12.- ANOVA de tres factores para el análisis de la deformación vertical de rotura a tracción indirecta.

En las tablas 7.10, 7.11 y 7.12 se incluyen los resultados de los análisis estadísticos realizados: suma de cuadrados (SC), grados de libertad (GL), porcentaje sobre la suma de cuadrados total (% SCT), cuadrado medio (CM), cociente-F (F) y p-valor (p).

En el primer ANOVA realizado, en base a los resultados obtenidos (tabla 7.10) puede verse que el estado (seco/húmedo), el porcentaje de AR y la utilización o no de pretratamiento (4 horas de reposo en estufa) son factores significativos ($p < 0,05$). Por tanto, como era previsible, el análisis estadístico confirma que los tres factores tienen influencia en la resistencia a tracción indirecta. Pero además, también es estadísticamente significativa la interacción entre el estado y el pretratamiento ($p = 0,0091 < 0,05$) y entre el porcentaje de AR y el pretratamiento ($p = 0,0457 < 0,05$). Es decir, se ha comprobado estadísticamente que, por un lado, el pretratamiento será más o menos efectivo en función del estado de la probeta y, por otro lado, será más o menos efectivo cuanto mayor sea el porcentaje de AR en la mezcla. Por tanto, el análisis estadístico confirma la interpretación de la figura 7.32: el pretratamiento es más efectivo en las probetas del grupo húmedo y además más efectivo cuanto mayor es el porcentaje de AR.

En el segundo ANOVA realizado, en base a los resultados obtenidos (tabla 7.11) puede verse que tan solo la utilización de pretratamiento (4 horas de reposo en estufa) es un factor significativo ($p < 0,05$), explicando un 76,80% % de la varianza total. Tras el análisis estadístico puede confirmarse que aplicar el tratamiento de reposo de 4 horas tiene una gran influencia en la sensibilidad al agua. Sin embargo, el porcentaje de AR no afecta significativamente a la sensibilidad al agua. La mala adhesividad del árido natural puede justificar este resultado. Sin pretratamiento ambos áridos (natural y reciclado) presentan mala adhesividad. Con pretratamiento, ambos áridos mejoran su afinidad con el betún.

Del tercer ANOVA (tabla 7.12) se puede concluir que únicamente es estadísticamente significativo el pretratamiento utilizado ($p = 0,001 < 0,5$). Por tanto, se confirma que la deformación vertical de rotura tan solo se ve afectada de forma significativa por el pretratamiento. Este resultado era previsible, pues se ha visto en la figura 7.33 que las mezclas sometidas a pretratamiento presentan valores de la deformación ligeramente inferiores a las mezclas sin pretratamiento. Ni el estado de la probeta (seco o húmedo) ni el porcentaje de AR utilizado afectan de forma estadísticamente significativa al valor de la deformación vertical de rotura a tracción indirecta.

7.5 RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE BETÚN Y LA SENSIBILIDAD AL AGUA

En el capítulo 6, como resultado del estudio de afinidad entre el árido y el ligante, se vio que el pretratamiento consistente en dejar reposar la mezcla suelta en estufa durante 4 horas a 170°C, mejoraba notablemente la afinidad entre el árido y el ligante. Así mismo en el apartado 7.3.3 se analizó la influencia del tiempo de reposo en estufa, llegándose a la conclusión de que a medida que aumentaba el tiempo de reposo en estufa de 0 horas a 4 horas, también aumentaba el índice de resistencia conservada a tracción indirecta (ITSR). En este sentido, cabe recordar que para el contenido de ligante del 4,5% y para el porcentaje de AR del 20% con 0 horas de reposo en estufa no se llegaba a alcanzar el valor mínimo del 80% de ITSR exigido por las especificaciones españolas para las capas de base; mientras que con 4 horas de reposo en estufa, este valor era superado holgadamente.

Como resultado del estudio de la sensibilidad al agua realizado en el apartado 7.4.3 se llegó a la conclusión de que con los contenidos óptimos de ligante obtenidos mediante el ensayo Marshall:

- Las mezclas sin pretratamiento no dan buenos resultados de sensibilidad al agua.
- Las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa sí alcanzan el valor mínimo del 80% de ITSR exigido por las especificaciones para las capas de base y, por tanto, dan buenos resultados en cuanto a sensibilidad al agua.

De todas formas, como se ha visto anteriormente, los contenidos óptimos de ligante obtenidos varían en función de si se aplica o no pretratamiento. Así para las mezclas sin pretratamiento los contenidos óptimos de ligante obtenidos son inferiores a los obtenidos para las mezclas con pretratamiento (figura 7.30). Cabe preguntarse en este momento hasta qué punto los buenos resultados obtenidos para las mezclas que se han dejado reposar 4 horas en estufa son consecuencia exclusiva del pretratamiento aplicado o están influenciados por el hecho de que se ha aumentado la cantidad de ligante.

Pues bien, para responder a esta cuestión se planteó la realización de un ensayo de tracción indirecta tras inmersión con las siguientes condiciones:

- Se fabricaron probetas con el 5%, 10%, 20% y 30% de AR.
- La cantidad de betún que se utilizó en cada caso corresponde al contenido óptimo de ligante determinado anteriormente para las probetas sin pretratamiento.
- Las probetas así dosificadas (48 en total) se fabricaron aplicando el pretratamiento de reposo en estufa durante 4 horas a 170°C.

Los resultados así obtenidos se compararon con los del ensayo de tracción indirecta tras inmersión realizado en el apartado 7.4.3, en el que las probetas se fabricaron con el mismo contenido de ligante y AR pero sin pretratamiento. Es decir, se comparan series de probetas idénticas (igual contenido de AR y de ligante), en las que la única diferencia es que en unas se aplica el reposo de 4 horas en estufa a 170°C y en otras no.

Los valores obtenidos, tanto las resistencias como el índice de resistencia conservada, se adjuntan en la tabla 7.13. Además, se representan en las figuras 7.34 y 7.35 para facilitar el análisis de resultados:

%AR	Pb (%) (*)	Sin pretratamiento (**)			4 horas de reposo en estufa		
		ITSd (MPa)	ITSw (MPa)	ITSR (%)	ITSd (MPa)	ITSw (MPa)	ITSR (%)
5	3,7	1,923	1,469	76,37	2,589	1,972	76,20
10	3,7	1,885	1,511	80,15	2,003	1,894	94,55
20	3,8	1,692	1,328	78,50	1,843	1,587	86,11
30	4,0	1,215	0,914	75,23	2,229	1,596	71,62

(*) Contenido óptimo de ligante obtenido para las probetas sin pretratamiento.

(**) Ensayo explicado en el apartado 7.4.3.

Tabla 7.13.- Comparativa de los resultados de los ensayos de tracción indirecta tras inmersión para probetas sin pretratamiento y con un reposo de 4 horas en estufa.

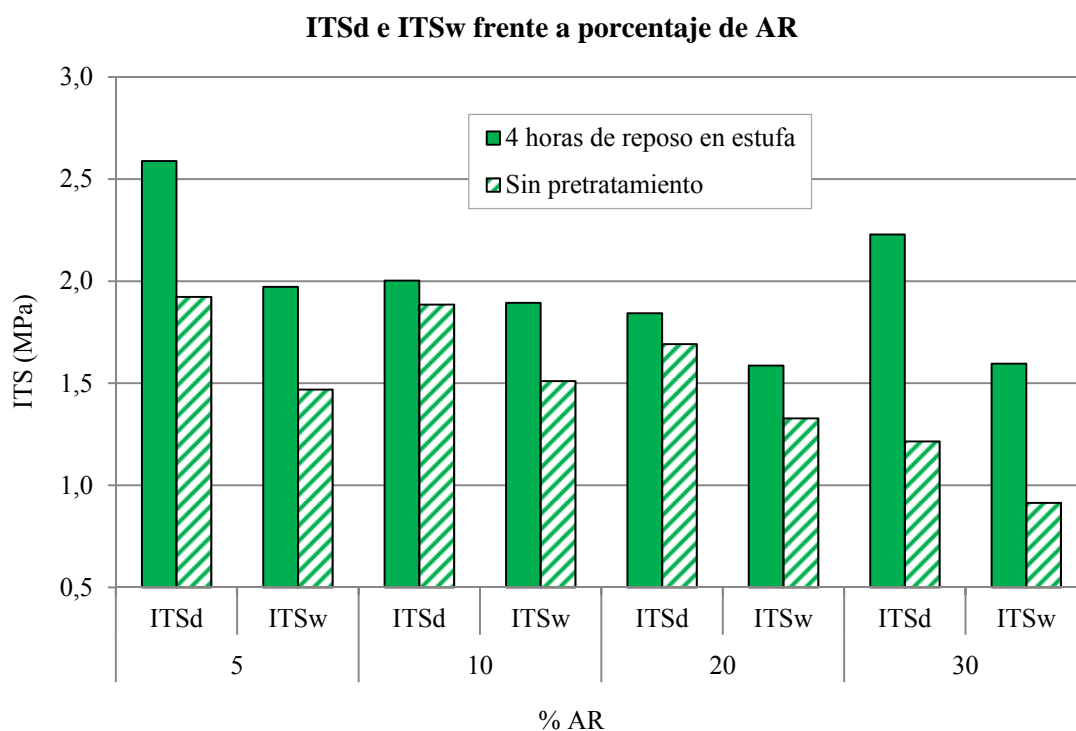


Figura 7.34.- Comparativa de las resistencias en seco y húmedo frente a porcentaje de AR.

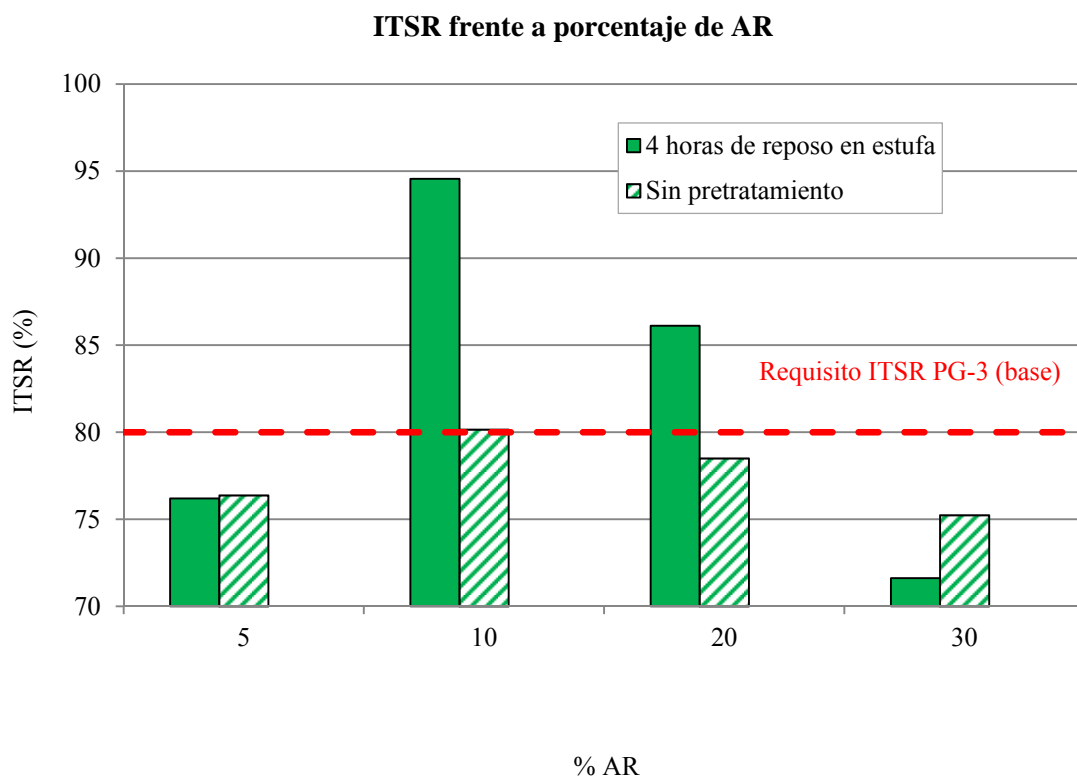


Figura 7.35.- Comparativa del índice de resistencia conservada a tracción indirecta frente a porcentaje de AR.

A la vista de la tabla 7.13 y de las figuras 7.34 y 7.35 puede concluirse lo siguiente:

- Las resistencias en seco y en húmedo son mayores cuando se aplica el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa que cuando éste no se aplica, para la misma cantidad de ligante y de AR.
- El ITSR mejora notablemente para los contenidos del 10 y 20% de AR al aplicar el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa; mientras que para el contenido del 5% de AR es similar.
- El ITSR para el contenido del 30% de AR no alcanza el valor mínimo del 80% exigido por las especificaciones para capas de base en ninguno de los casos. Además al aplicar el pretratamiento se obtienen valores ligeramente inferiores del ITSR. Este resultado se debe a que la cantidad de ligante empleada es insuficiente, pues al tener el AR un fuerte carácter absorbente, con un elevado porcentaje de AR, como es el caso del 30%, la cantidad de ligante efectivo es inferior a la necesaria.

Por tanto, puede decirse que el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa efectivamente mejora las resistencias a tracción indirecta en seco y en húmedo y mejora la sensibilidad al agua de las mezclas fabricadas con sustitución parcial de árido natural por AR. Pero es preciso matizar que, como era previsible, la cantidad de ligante utilizado en la dosificación influye en la efectividad del pretratamiento. Por tanto, se hace necesario seleccionar adecuadamente el contenido de ligante. Al tener el AR un fuerte carácter absorbente, fabricar las mezclas con cantidades de ligante pequeñas puede llevar a que la cantidad de ligante efectiva sea insuficiente, como se ha visto en el caso del 30% de AR. Esto es así porque el pretratamiento aplicado permite una mayor absorción de ligante en los poros del AR.

Como último paso para confirmar estos resultados, para el 30% de AR se ha planteado un ensayo de forma inversa al planteado inicialmente: con el contenido óptimo de ligante obtenido para las probetas con 4 horas de reposo en estufa (es decir, el óptimo con pretratamiento) se fabrican probetas sin aplicar el pretratamiento. Se realizaron un total de 12 probetas. Los resultados obtenidos se reproducen en la tabla 7.14 adjunta:

%AR	Pb (%) (*)	Sin pretratamiento			Reposo en estufa (**)		
		ITSd (MPa)	ITSw (MPa)	ITSR (%)	ITSd (MPa)	ITSw (MPa)	ITSR (%)
30	4,3	2,058	1,705	82,8	1,702	1,680	98,7

(*) Contenido óptimo de ligante obtenido para probetas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa.

(**) Ensayo explicado en el apartado 7.4.3.

Tabla 7.14.- Comparativa de los resultados de los ensayos de tracción indirecta tras inmersión para probetas con un 30% de AR sin pretratamiento y con un reposo de 4 horas en estufa.

Como puede verse en la tabla 7.14, la aplicación del pretratamiento mejora notablemente la sensibilidad al agua de las probetas. En el caso de las probetas sin pretratamiento se supera de forma ajustada el valor del 80% dado por la especificaciones españolas (82,8%); mientras que en las probetas con pretratamiento se supera holgadamente (98,7%). Por tanto, puede verse que aunque efectivamente el contenido de ligante tiene influencia en los resultados, el pretratamiento aplicado mejora notablemente la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente fabricadas con AR de tipo hormigón en porcentajes de hasta un 30%.

Capítulo 8

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN CALIENTE CON ÁRIDOS DE RCD

8.1 INTRODUCCIÓN

Durante su vida útil los firmes de las carreteras deben soportar las solicitaciones del tráfico y climatológicas. Una de sus principales funciones es la de asegurar que las tensiones lleguen lo suficientemente atenuadas a la explanada con el fin de que no se produzcan daños en la misma. Pero además deben proporcionar una superficie de rodadura cómoda y segura y proteger a la explanada de la intemperie (Kraemer et al., 2004). Por todo ello es necesario estimar el comportamiento estructural del firme y, por consiguiente, la caracterización de las mezclas bituminosas desde el punto de vista mecánico resulta fundamental.

En este sentido, en este capítulo se describen los trabajos realizados en el “Laboratorio de Caminos” de la E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos de la Universidade da Coruña para analizar las principales propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas en caliente fabricadas con árido reciclado (AR) de tipo hormigón procedente de residuos de construcción y demolición (RCD): rigidez, resistencia a la deformación permanente y resistencia a la fatiga. Como se ha visto en capítulos anteriores, la mezcla objeto de la presente investigación es un hormigón bituminoso en caliente para capa de base de tipo AC 22 base G. Esta mezcla ha sido fabricada con betún B50/70 y diferentes porcentajes de sustitución de árido natural (corneana) por AR: 0%, 5%, 10%, 20% y 30%. Se han ensayado mezclas con dos tipos de pretratamiento: 4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d. Debido a que en el capítulo anterior el pretratamiento de reposo en estufa fue seleccionado como el más idóneo de los dos, en este capítulo el estudio de las propiedades de la mezcla se ha realizado de forma más completa para este pretratamiento.

8.2 RIGIDEZ

Para abordar el estudio de la rigidez de las mezclas bituminosas se pueden utilizar diversos módulos: Complejo, Dinámico, etc (Mamlouk y Sarofim, 1988). Uno de los más habitualmente utilizados es el módulo resiliente, pues representa el comportamiento elástico de las mezclas y es el más adecuado para su utilización en modelos de cálculo basados en la teoría multicapa (Mamlouk y Sarofim, 1988).

En este sentido, cabe decir que las mezclas bituminosas no son un material elástico, sino

que presentan una cierta deformación permanente tras cada aplicación de la carga (Huang, 2004). Sin embargo, si la carga aplicada es pequeña en comparación con la resistencia del material y se repite durante un suficiente número de ciclos, la deformación que se produce bajo cada una de las aplicaciones de la carga es prácticamente recuperable y proporcional a la misma, pudiendo considerarse como elástica (Huang, 2004). Al módulo de rigidez que se obtiene en ese momento, cuando la relación entre las tensiones y las deformaciones de una mezcla bituminosa permanece constante, se le denomina módulo resiliente, M_R .

El ensayo más habitualmente utilizado para la determinación del módulo resiliente de las mezclas bituminosas es el ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (IT-CY), que consiste en someter a una probeta cilíndrica a cargas de compresión en el plano vertical diametral. En la presente investigación se ha realizado el ensayo IT-CY siguiendo el procedimiento descrito en el Anexo C de la norma UNE-EN 12697-26 (AENOR, 2006e) con la máquina servo-neumática NU 14 de Cooper (figura 8.1). Como se muestra en la figura 8.2, las probetas cilíndricas Marshall de 101,5 mm de diámetro y 63,5 mm de altura, compactadas mediante 75 golpes por cara, se colocaron en el utillaje para tracción indirecta.



Figura 8.1.- Detalle de la máquina NU 14 con el utillaje para realizar el ensayo de rigidez a tracción indirecta (módulo resiliente).

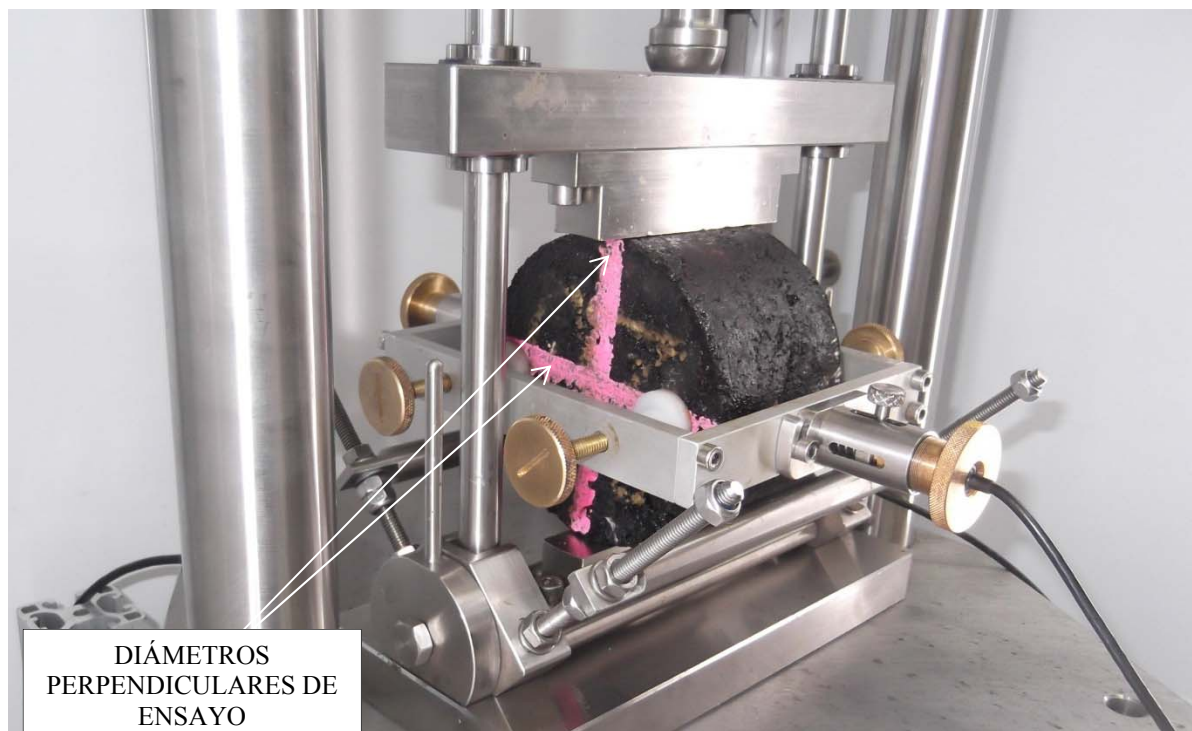


Figura 8.2.- Ensayo de rigidez (módulo resiliente). Mezcla con un 5% de AR, un 4,0% de ligante y 4 horas de reposo en estufa.

Como puede observarse en la figura 8.3, una vez adaptada la probeta al utillaje, se aplicó una carga en forma de onda de medio seno con un período de repetición de los impulsos de $3 \pm 0,1$ segundos. La carga máxima se seleccionó para conseguir una deformación horizontal transitoria máxima del 0,005% del diámetro de la probeta ($5 \mu\text{m}$). El tiempo de subida medido entre el comienzo del impulso y la carga máxima se fijó en 124 ± 4 ms. Se aplicaron 10 impulsos de acondicionamiento, seguidos de 5 impulsos de carga. El módulo de rigidez para cada uno de los 5 impulsos de carga se obtuvo según la siguiente expresión (AENOR, 2006e):

$$M_R = \frac{F \times (\nu + 0,27)}{z \times h} \quad (8.1)$$

donde:

- M_R = módulo resiliente (MPa).
- F = carga máxima vertical aplicada (N), según se representa en la figura 8.3.
- z = amplitud de la deformación horizontal total (figura 8.3) obtenida durante el ciclo de carga (mm).
- h = espesor medio de la probeta (mm).
- ν = coeficiente de Poisson. Para todas las temperaturas se adoptó un valor de 0,35 (AENOR, 2006e).

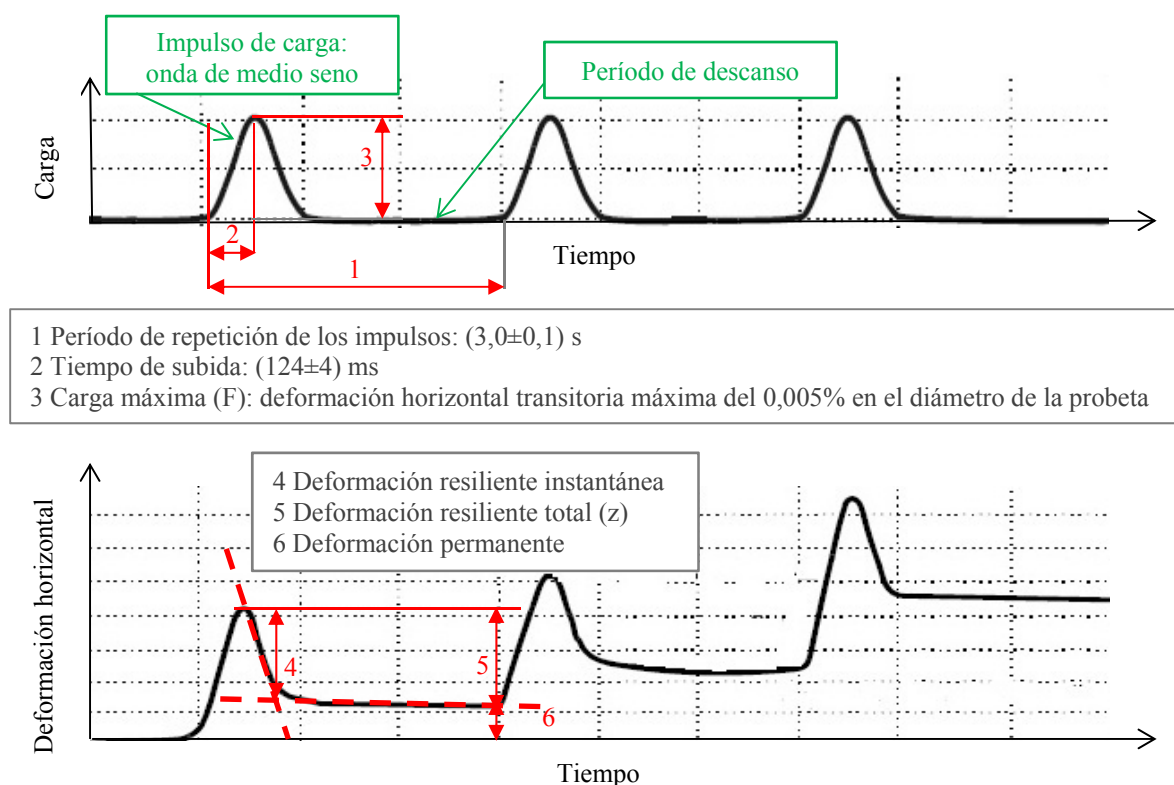


Figura 8.3.- Diagrama típico de carga y deformación del ensayo de rigidez a tracción indirecta. Fuente: AENOR (2006e), FHWA (2007a y 2007b) y Tabatabaie et al. (2008).

El módulo de rigidez obtenido para cada uno de los 5 impulsos de carga aplicados se ajustó para tener en cuenta el factor de superficie de carga y se hizo la media de los 5 módulos ajustados. Como puede apreciarse en la figura 8.2 en cada probeta se marcaron dos diámetros perpendiculares. Primero se llevó a cabo el ensayo con uno de sus diámetros colocados en posición vertical. Transcurrido un mínimo de 20 minutos tras la obtención del módulo del primer diámetro, se giró la probeta 90° para poder ensayarla en el diámetro perpendicular al anterior. La media de los dos módulos obtenidos (uno en cada diámetro) es el módulo resiliente del ensayo. El ensayo se llevó a cabo a tres temperaturas diferentes: 0°C , 10°C y 20°C . Así se obtuvieron datos suficientes como para analizar la variación del módulo resiliente con la temperatura.

Como se ha comentado en la introducción se estudiaron dos pretratamientos: 4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d. El pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa se analizó con una mayor profundidad, por ello se ha considerado de interés de cara a la investigación compararlo con un tiempo de reposo en estufa menor (2 horas). Además con el fin de tener valores del módulo resiliente de referencia se ha ensayado también una mezcla de control (0 horas de reposo en estufa). Por tanto, finalmente se

ensayaron probetas a las que se les aplicó uno de los siguientes pretratamientos: 4 horas de reposo en estufa, 2 horas de reposo en estufa, 0 horas de reposo en estufa (mezcla de control) y preenvuelta del AR con ECL-2d. Se fabricaron probetas con porcentajes del 0%, 5%, 10%, 20% y 30% de AR. Todas ellas se ensayaron para contenidos de ligante del 3,5%, 4% y 4,5% sobre la masa total de la mezcla. Además, se obtuvo el módulo resiliente de mezclas bituminosas elaboradas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, pero con los contenidos óptimos de ligante obtenidos en el capítulo anterior. En la tabla A3.2 (Anexo 3) se adjuntan los datos de entrada necesarios para poder realizar el ensayo del módulo resiliente: diámetro, altura y densidad aparente de las 124 probetas fabricadas. En la tabla A3.3 (Anexo 3) pueden verse los módulos resilientes obtenidos.

Aunque en España no hay especificaciones técnicas relativas al valor del módulo resiliente para mezclas convencionales, para mezclas de alto módulo (MAM) el PG-3 exige que a 20°C sea superior a 11.000 MPa.

Como puede verse en la tabla A3.4 solamente hay dos valores del módulo resiliente a 20°C superiores a los 11.000 MPa exigidos por el PG-3 para las MAM. Estos dos valores han sido obtenidos para las mezclas a las que se les aplicó el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. En concreto se obtuvieron para los porcentajes de AR del 5% y del 30%, ambos con un contenido de betún del 3,5%. Para este pretratamiento también se han obtenido otros valores muy próximos a esos 11.000 MPa. En particular para porcentajes del 20% y del 30% de AR con el contenido óptimo de ligante se obtienen módulos de rigidez superiores a 10.500 MPa. Como es sabido, para las condiciones climáticas que se dan en España y para una mezcla con granulometría gruesa (como la AC 22 base G en estudio) se suele adoptar un valor del módulo resiliente a 20°C de 5.000 MPa (Ruiz Rubio y Jofre Ibáñez, 2003). Como puede verse con el pretratamiento de **4 horas de reposo en estufa** se supera ampliamente el valor medio para todos los porcentajes de AR y betún ensayados. A la vista de los resultados puede decirse que para este pretratamiento se obtienen mezclas **muy rígidas**, con una **rigidez muy superior a la de las mezclas convencionales** y muy **próxima a la de las MAM**.

Por el contrario, esto no es así para las mezclas que se han dejado reposar 2 horas y 0 horas en la estufa ni para las mezclas fabricadas con AR preenvuelto con ECL-2d. Para 2 horas de reposo en estufa se obtienen módulos resilientes a 20°C algo superiores al valor medio

de 5.000 MPa, pero muy lejanos a los 11.000 MPa exigidos a las MAM. Para 0 horas y preenvuelta con ECL-2d se obtienen valores del orden de 5.000 MPa a 20°C, es decir, del orden del valor medio habitual para este tipo de mezclas. Por tanto, pueden deducirse dos cosas. La primera es que las mezclas fabricadas con los pretratamientos de 0 horas y 2 horas de reposo en estufa, así como las elaboradas con el pretratamiento de preenvuelta del AR con emulsión, son válidas para su utilización en firmes de carreteras. La segunda es que la mayor rigidez de las mezclas que han estado 4 horas en estufa se debe principalmente a la mayor absorción de betún que se produce cuando se deja a la mezcla reposar en la estufa el tiempo suficiente. Así, de forma general puede decirse que cuanto mayor es el tiempo que se deja a la mezcla absorber ligante mayor será su rigidez.

La American Association of State Highway and Transportation Officials (1993) recomienda utilizar con precaución las mezclas bituminosas en caliente para capa de rodadura que presenten un valor del módulo resiliente superior a los 3.100 MPa a 20°C, ya que son susceptibles a presentar fisuración por retracción térmica. Aunque la AC 22 base G está diseñada para capa de base y no para capa de rodadura, puesto que todos los módulos resilientes a 20°C son bastante superiores al límite indicado anteriormente, sería a priori recomendable no disponer estas mezclas en zonas frías, en particular si a la mezcla se le aplica el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, ya que, como se ha visto, da lugar a mezclas más rígidas. Sin embargo, puesto que en España las temperaturas son más moderadas que en los EE.UU., no llegando a alcanzarse valores tan bajos, estas mezclas **no** deberían dar **problemas en las zonas frías de España**.

Para facilitar la interpretación de los resultados, los valores de la tabla A3.4 se han plasmado en la figura 8.4. En ella se representa el módulo resiliente en función del porcentaje de AR empleado. Como puede observarse, tanto para la mezcla de control (0 horas de reposo en estufa) como para los otros tres pretratamientos aplicados (4 horas y 2 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d), los resultados se agrupan por temperaturas de ensayo (0°C, 10°C y 20°C) y contenidos de ligante (3,5%, 4,0%, 4,5% y óptimo).

Puede verse que hay una conclusión muy clara: el módulo resiliente aumenta notablemente con la disminución de la temperatura de ensayo. Es decir, como era esperado, a menor temperatura mayor será la rigidez de la mezcla. En este orden de ideas, cabe señalar que las

diferencias entre los valores del módulo resiliente a 0°C y 20°C son más acusadas en la mezcla de control y en la mezcla en la que el AR se ha preenvuelto con ECL-2d que en las mezclas fabricadas con pretratamiento de 2 y 4 horas de reposo en estufa. Además con 2 horas de reposo en estufa las diferencias entre los valores del módulo de rigidez a diferentes temperaturas son mayores que las obtenidas con 4 horas de reposo en estufa. Esto indica que la **absorción de betún por parte del árido suaviza el efecto de la temperatura en la rigidez de las mezclas bituminosas**, tanto más cuanto mayor es la absorción de ligante.

También se puede observar cómo los valores del módulo de rigidez son muy similares para los diferentes porcentajes de AR ensayados (0%, 5%, 10%, 20% y 30%). Sin embargo para el contenido óptimo de ligante, con el pretratamiento de 4 horas, a 20°C, los módulos de rigidez presentan una cierta tendencia a aumentar ligeramente al incrementarse el contenido de AR. Esta tendencia solo se cumple hasta el 20% de AR. Por tanto, el porcentaje de AR parece tener muy poca influencia en el valor del módulo resiliente, pues su efecto se ve difuminado por otros, principalmente la temperatura de realización del ensayo y, en los casos en los que se ha dejado a la mezcla reposar en estufa, la absorción de ligante. Además, apenas se aprecia variación en el módulo resiliente obtenido para los diferentes contenidos de ligante (3,5%, 4% y 4,5%). Luego, dentro del rango de contenidos de ligante ensayados, su porcentaje no parece tener influencia en la rigidez de la mezcla.

Resulta de interés analizar en detalle la relación entre el tiempo de reposo en estufa y la rigidez de la mezcla. También es interesante comparar los resultados obtenidos para la mezcla fabricada con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa y los obtenidos para la mezcla de control. Para ello, en la figura 8.5, se plasman los módulos resilientes obtenidos para diferentes tiempos de reposo en estufa (4 horas, 2 horas y 0 horas) a las tres temperaturas de ensayo (0°C, 10°C y 20°C) y para los tres contenidos de ligante que han sido ensayados en común en todos los pretratamientos (3,5%, 4,0% y 4,5%).

Con la realización de la figura 8.5 se pretende hacer hincapié en una conclusión que ya se había comentado anteriormente: con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa se obtienen en general las mezclas más rígidas para los tres contenidos de ligante ensayados (3,5%, 4% y 4,5%) y para los cinco porcentajes de AR considerados (0%, 5%, 10%, 20% y 30%). Este patrón de comportamiento se hace especialmente evidente cuanto mayor es la

temperatura de realización del ensayo. Así, a 20°C las diferencias en los módulos de rigidez obtenidos con los pretratamientos de 4 horas, 2 horas y 0 horas, son mayores que los obtenidos a 0°C.

A 0°C esta tendencia también se produce, aunque no de forma tan clara. Concretamente en el caso de 0°C y un contenido del 0% de AR es cuando mejor se aprecia que la tendencia no se cumple. Esto podría deberse al menor carácter absorbente del árido natural y a la temperatura de ensayo. A 0°C la propia temperatura de ensayo rigidiza la mezcla, de tal forma que el efecto que tiene la absorción de ligante sobre la rigidez de la mezcla no es tan acusado como a 20°C.

En el capítulo anterior, cuando se determinaron los módulos Marshall, también se vio cómo dejar reposar 4 horas en estufa la mezcla producía mezclas más rígidas que si no se dejaban reposar. Por tanto, a la vista de los resultados aquí obtenidos y de los obtenidos en el capítulo 7, se puede concluir que **dejar reposar la mezcla en la estufa antes de su compactación la rigidiza**. Además, **cuanto mayor es el tiempo de reposo** en estufa (entre 0 y 4 horas) más elevada es la absorción de ligante y, por tanto, **mayor es la rigidez** alcanzada.

En la figura 8.6 se compara el pretratamiento consistente en realizar la preenvuelta del AR con ECL-2d y la mezcla de control. Así se han graficado los resultados de ambos pretratamientos agrupados por temperatura de realización del ensayo y contenido de ligante. Observando la figura 8.6 puede concluirse que **al realizar la preenvuelta del AR con ECL-2d también se rigidiza la mezcla**, aunque en mucho menor medida que al dejar la mezcla reposando 4 horas en estufa (figura 8.5).

En la figura 8.7 se comparan los dos pretratamientos analizados: 4 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d. Puede verse como efectivamente el pretratamiento de 4 horas en estufa rigidiza más la mezcla para cualquier porcentaje de AR (0%, 5%, 10%, 20% y 30%) y de ligante (3,5%, 4% y 4,5%) que el pretratamiento consistente en preenvolver el AR con un 5% de ECL-2d. Como se ha visto la rigidización se hace más evidente cuanto mayor es la temperatura de ensayo. Así, a 20°C (figura 8.7c) es más evidente que a 0°C (figura 8.7a).

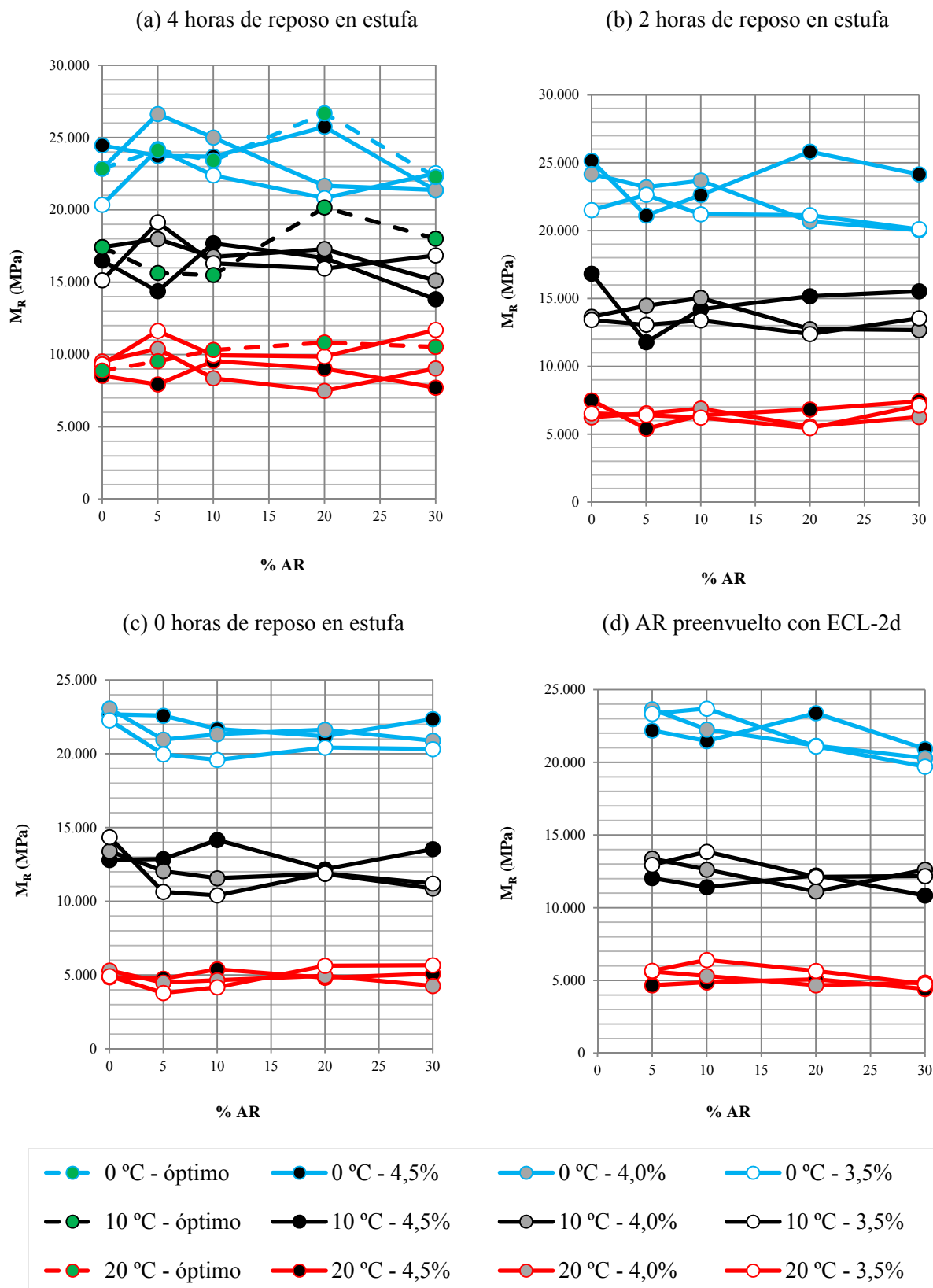


Figura 8.4.- Módulos de rigidez en función del porcentaje de AR para las mezclas fabricadas con: (a) 4 horas de reposo en estufa, (b) 2 horas de reposo en estufa, (c) 0 horas de reposo en estufa (mezcla de control) y (d) AR preenvuelto con ECL-2d.

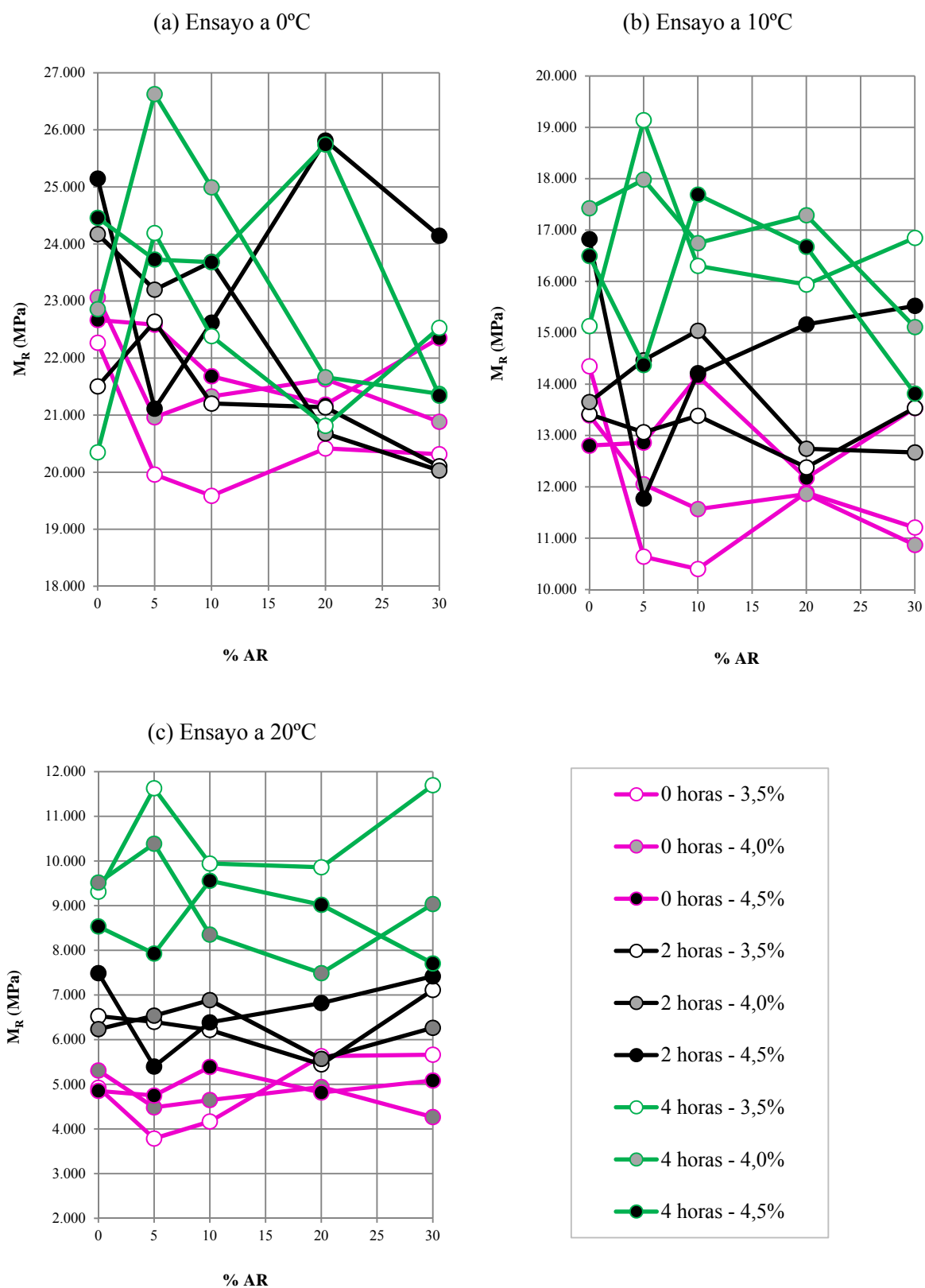


Figura 8.5.- Módulos de rigidez en función del porcentaje de AR para las mezclas que se han dejado reposar en estufa 4 horas, 2 horas y 0 horas: (a) Ensayo a 0°C, (b) Ensayo a 10°C y (c) Ensayo a 20° C.

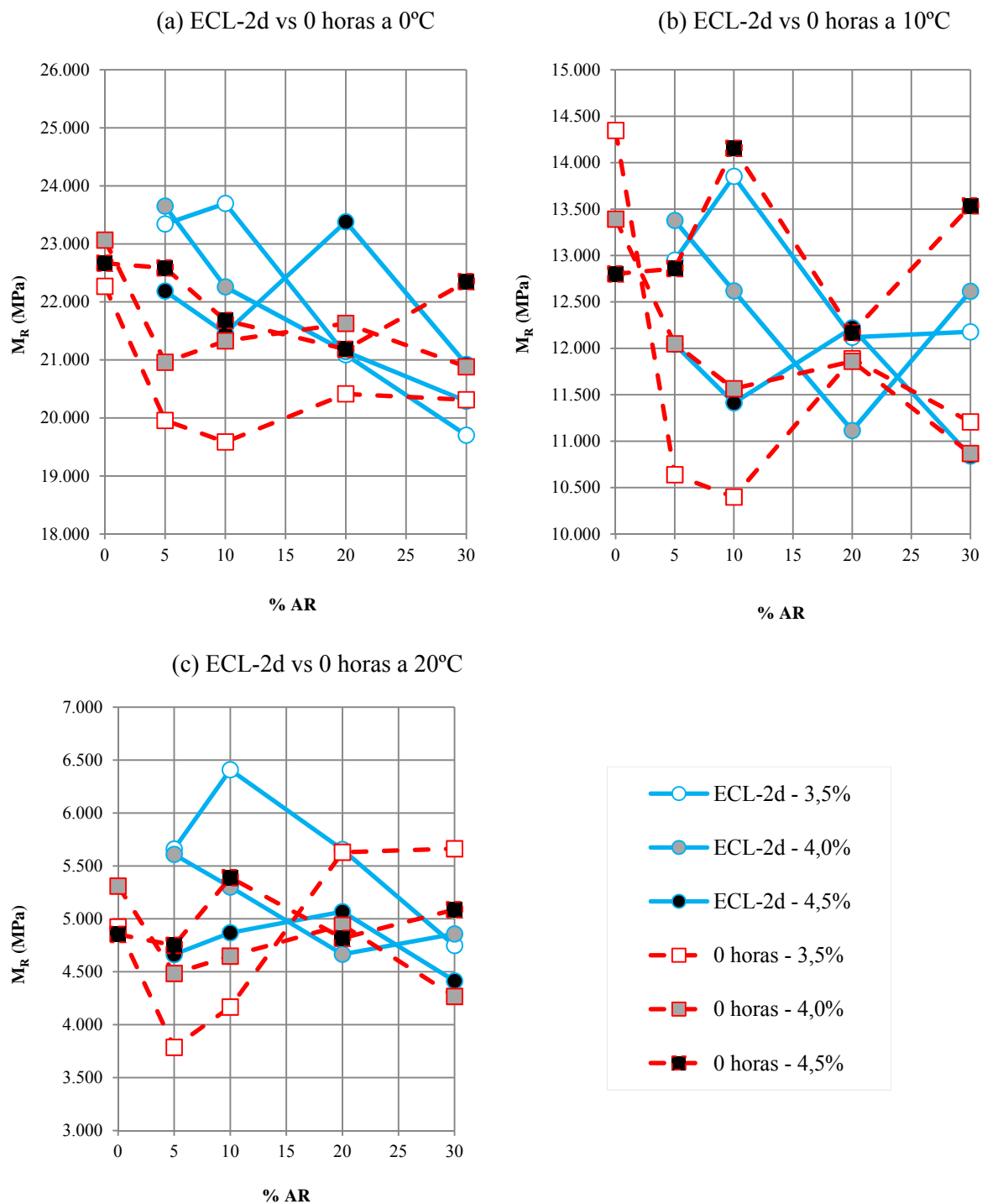


Figura 8.6.- Módulos de rigidez en función del porcentaje de AR para las mezclas que se han fabricado con AR preenvuelto con ECL-2d y las mezclas sin pretratar: (a) 0°C, (b) 10°C y (c) 20°C.

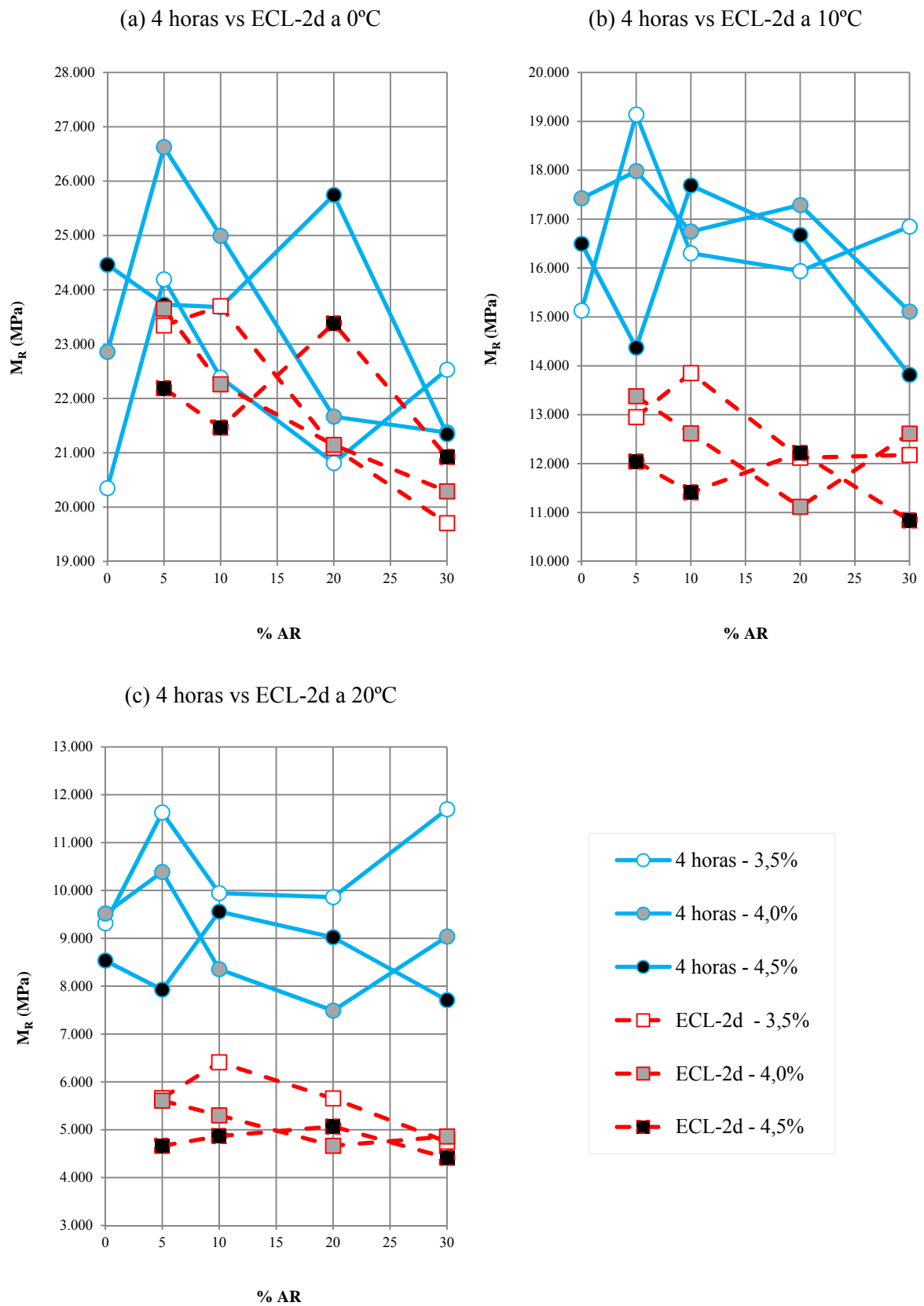


Figura 8.7.- Módulos de rigidez en función del porcentaje de AR para las mezclas que se han dejado reposar 4 horas en estufa y las que se han fabricado con AR preenvuelto con ECL-2d: (a) 0°C, (b) 10°C y (c) 20°C.

Con el fin de comprobar si existe una diferencia significativa entre las medias de los módulos de rigidez de acuerdo con la temperatura de ensayo, el pretratamiento, el porcentaje de AR y el contenido de ligante, se ha llevado a cabo la realización de un análisis ANOVA de cuatro factores (tabla 8.1). Como es lógico, en este caso la variable independiente es el módulo de rigidez (M_R) obtenido a tracción indirecta; mientras que las cuatro variables dependientes son: temperatura de realización del ensayo (0°C, 10°C y 20°C), el pretratamiento aplicado (reposo de 4 horas, 2 horas, 0 horas o sin pretratamiento y preenvuelta del AR con ECL-2d), el porcentaje de AR (0%, 5%, 10%, 20% y 30%) y el contenido de ligante (3,5%, 4,0% y 4,5%). El pretratamiento aplicado es una variable cualitativa, mientras que el módulo de rigidez y el resto de los factores son variables cuantitativas.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: temperatura	7,1E+09	2	91,8	3,5E+09	2.006,2	0,000
B: pretratamiento	3,2E+08	3	4,1	1,1E+08	59,7	0,000
C: % de AR	1,8E+07	4	0,2	4,6E+06	2,6	0,038
D: contenido de ligante	5,2E+06	2	0,1	2,6E+06	1,5	0,233
Residuos	2,8E+08	159	3,6	1,8E+06		
Total (corregido)	7,7E+09	170	100			

Tabla 8.1.- ANOVA de cuatro factores para el análisis del módulo de rigidez a tracción indirecta.

En la tabla 8.1 se presentan los resultados del ANOVA: suma de cuadrados (SC), grados de libertad (GL), porcentaje sobre la suma de cuadrados total (% SCT), cuadrado medio (CM), cociente-F (F) y p-valor (p). En base a los resultados obtenidos puede verse que tres de los cuatro factores son significativos ($p < 0,05$): la temperatura, el pretratamiento y el porcentaje de AR; el contenido de ligante no es estadísticamente significativo ($p = 0,233 > 0,05$). El factor que, sin lugar a duda, más influencia tiene es la temperatura de realización del ensayo, ya que explica un 91,8% de la varianza total. Por tanto, el modelo estadístico parece confirmar el análisis de los resultados obtenidos: la temperatura es fundamental en la rigidez de las mezclas. Este resultado era esperado, pues como es bien sabido, cuanto menor es la temperatura de ensayo, mayor es la rigidez de la mezcla.

También el tipo de pretratamiento aplicado es significativo, con lo cual la conclusión de que los pretratamientos rigidizan la mezcla, también tiene su aval estadístico. El único

punto sorprendente en el modelo estadístico es que el porcentaje de AR sí es estadísticamente significativo, cuando todos los resultados obtenidos parecen indicar que el porcentaje de AR no tiene influencia en la rigidez. Esto podría deberse a que el porcentaje de AR sí tienen influencia en la absorción de ligante y, por tanto, en la rigidez. De todas formas, su contribución a la explicación de la varianza total es muy baja, de tan solo un 0,2%.

8.3 RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE

Como se ha visto, con el fin de determinar el comportamiento de las mezclas bituminosas frente a la deformación permanente, se debe analizar la respuesta del material cuando presenta una rigidez baja; es decir, a elevadas temperaturas o grandes períodos de aplicación de las cargas (Read y Whiteoak, 2003). Para ello, en la presente tesis se han llevado a cabo dos ensayos:

- Ensayo cíclico de compresión uniaxial
- Ensayo de rodadura (ensayo en pista de laboratorio)

A continuación se describen dichos ensayos y los resultados obtenidos.

8.3.1 Ensayo cíclico de compresión uniaxial

Los ensayos de compresión uniaxial se pueden llevar a cabo bajo carga constante o bajo carga cíclica. Consisten en someter a una probeta generalmente cilíndrica de mezcla bituminosa a cargas de compresión axial a una temperatura fija de ensayo. Para llevar a cabo el ensayo se sitúa la muestra entre dos platos de carga planos y paralelos, uno fijo y otro móvil, de tal forma que la carga se da gracias al plato móvil. Para reducir al máximo la fricción con los platos estos deben estar adecuadamente lubricados. Con ayuda de unos transductores se registra la deformación axial en función del tiempo. Cuando los resultados se dan en forma de deformación relativa, es decir, respecto a la altura original de la probeta, éstos son independientes de la forma y de la relación entre el radio y la altura de la probeta.

El ensayo bajo carga constante es poco costoso y fácil de realizar, pero no representa bien las condiciones reales a las que va a estar sometida la mezcla (Brown et al., 2001). Por

ello, en la presente tesis se ha considerado más adecuado realizar el ensayo bajo carga repetida, es decir, aplicando varios miles de repeticiones y midiendo las deformaciones plásticas acumuladas en función del número de ciclos de carga.

En concreto, dentro de este tipo de ensayos, se ha realizado el ensayo de compresión uniaxial sin confinamiento bajo carga repetida, RLAT (*“Repeated Load Axial Test”* en la terminología anglosajona), siguiendo el procedimiento descrito en el documento británico DD 226:1996 (BSi, 1996). Como las cargas aplicadas para la obtención del módulo resiliente fueron pequeñas, estos ensayos fueron no destructivos, de tal forma que las mismas probetas utilizadas para este ensayo pudieron utilizarse para el ensayo de resistencia a la deformación permanente. Así, para el RLAT se ensayaron las mismas 124 probetas indicadas en la tabla A3.2 (Anexo 3) a una temperatura de 30°C.

Las probetas cilíndricas Marshall de 101,5 mm de diámetro y 63,5 mm de altura, compactadas mediante 75 golpes por cara, se colocaron en el utillaje para deformación permanente, entre los dos platos de carga (figura 8.8). Para reducir la fricción entre los platos y las caras planas de las probetas, éstas se untaron con grasa de silicona y polvo de grafito.

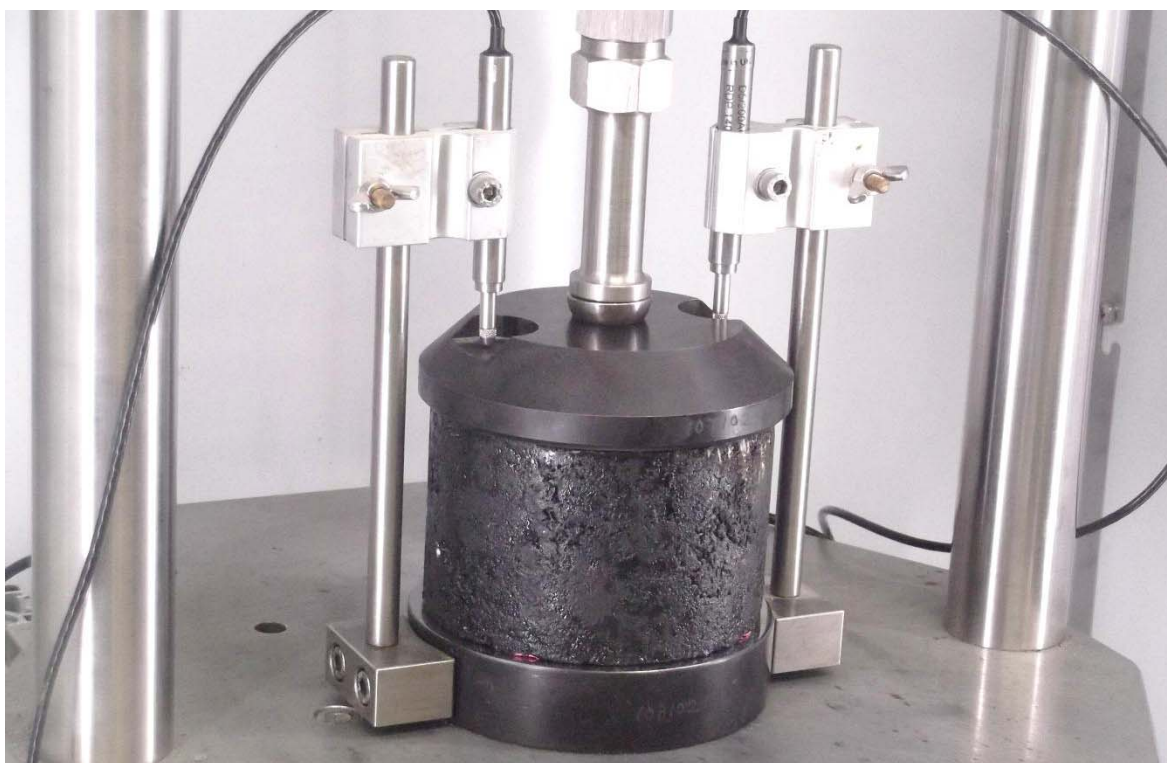


Figura 8.8.- RLAT. Mezcla con un 30% de AR, un 3,5% de ligante y 2 horas de reposo en estufa.

Como puede verse en la figura 8.9, en primer lugar, la probeta se sometió a un período de acondicionamiento aplicando una precarga de 10kPa durante 600 segundos. A continuación, se aplicaron un total de 1.800 impulsos de carga axial de 100 kPa de 1 segundo de duración y 1 segundo de descanso entre períodos de carga. Como se representa también en la figura 8.9, la deformación permanente de la probeta va aumentando a medida que se van produciendo las aplicaciones de la carga.

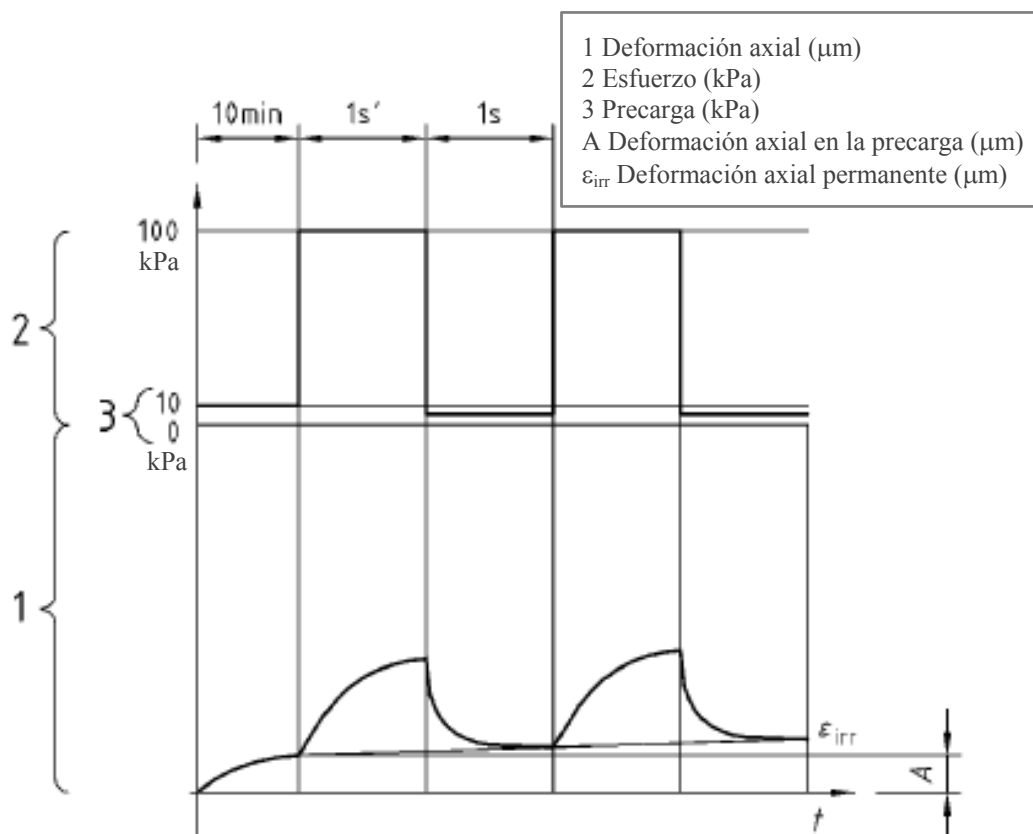


Figura 8.9.- Configuración de la carga en el ensayo RLAT (se representan solo dos de los 1.800 ciclos de carga). Fuente: AENOR (2006d).

Puede verse en la figura 8.9 que durante la realización del ensayo RLAT, para cada una de las aplicaciones de los impulsos de carga, se produce una relación de las tensiones y las deformaciones en el tiempo similar a la que se representa con mayor detalle en la figura 8.10. Como puede verse, la deformación se divide en cuatro componentes en función de su dependencia del tiempo y de su recuperabilidad tras cesar la aplicación de las cargas (Lu y Wright, 1998). Así, puede distinguirse entre deformación elástica (ϵ_e), deformación plástica (ϵ_p), deformación viscoelástica (ϵ_{ve}) y deformación viscoplástica (ϵ_{vp}) (Lu y Wright, 1998). Como es sabido, la deformación elástica y la viscoelástica son

recuperables; mientras que la deformación plástica y la viscoplástica no son recuperables. Por tanto, puesto que durante la realización del ensayo RLAT se mide la deformación permanente, lo que realmente se está considerando es la suma de la deformación plástica y la deformación viscoplástica para cada ciclo de carga.

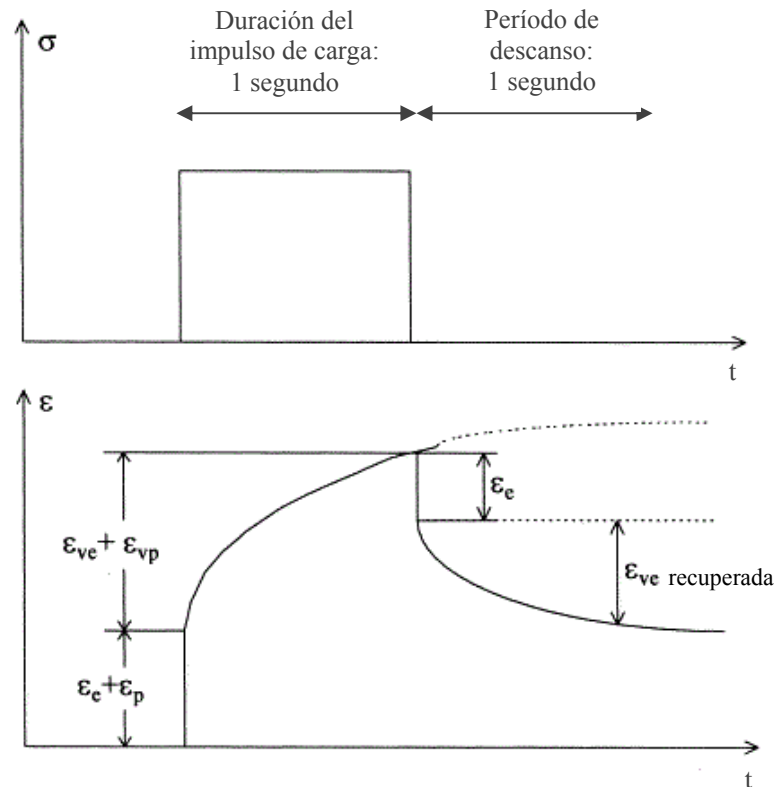


Figura 8.10.- Relación típica de las tensiones (σ) y las deformaciones (ϵ) con el tiempo (t), durante la aplicación de un ciclo de carga. Fuente: BSi (1996) y Lu y Wright (1998).

Para determinar la deformación axial permanente se utilizó la siguiente expresión (BSi, 1996):

$$\epsilon_{d,(n,T)} = \frac{\Delta h}{h_0} \times 100 \quad (8.2)$$

donde:

- $\epsilon_{d,(n,T)}$ = deformación axial permanente tras n aplicaciones de la carga a la temperatura T expresada en $^{\circ}\text{C}$ (%). En la presente investigación $n=1.800$ y $T=30^{\circ}\text{C}$.
- h_0 = distancia original entre los platos de carga (mm).
- Δh = deformación axial (cambio en la distancia entre los platos de carga) (mm).

Tal y como se ilustra en la figura 8.11, en general, el resultado del ensayo RLAT se suele representar por la evolución de la deformación permanente en función del número de ciclos de carga aplicados (curva de fluencia). Como puede verse, en la curva de fluencia se distinguen típicamente tres etapas, aunque en función del tipo de mezcla y de las condiciones del ensayo, una o varias etapas podrían no aparecer (AENOR, 2006d):

- En la etapa inicial (primaria), la pendiente de la curva decrece con el aumento del número de ciclos de carga.
- En la etapa media (secundaria), la pendiente de la curva permanece casi constante. En esta etapa se produce un punto de inflexión, es decir, un punto en el cual la curva de fluencia presenta un cambio de curvatura, pasando de ser convexa a ser cóncava. De forma convencional se considera que este punto identifica un estado crítico del material, de tal forma que si se alcanza se produciría el fallo de la mezcla (Santagata et al., 2007).
- En la etapa final (terciaria), la pendiente de la curva aumenta con el número de aplicaciones de la carga. Como es bien sabido, la deformación permanente en una mezcla bituminosa en caliente tiene lugar fundamentalmente por la acción de dos mecanismos: densificación (decremento en el contenido de huecos de aire que implica una reducción del volumen) y flujo plástico (los áridos y el ligante se mueven sin que se produzca un cambio de volumen). Es en esta etapa final cuando aparece el flujo plástico de la mezcla bituminosa. Al número de ciclos en el que comienza el flujo plástico, es decir, en el que comienza la etapa terciaria, se le denomina en la literatura anglosajona *Flow number* (FN) y es indicativo del potencial de la mezcla para presentar roderas (NCHRP, 2002).

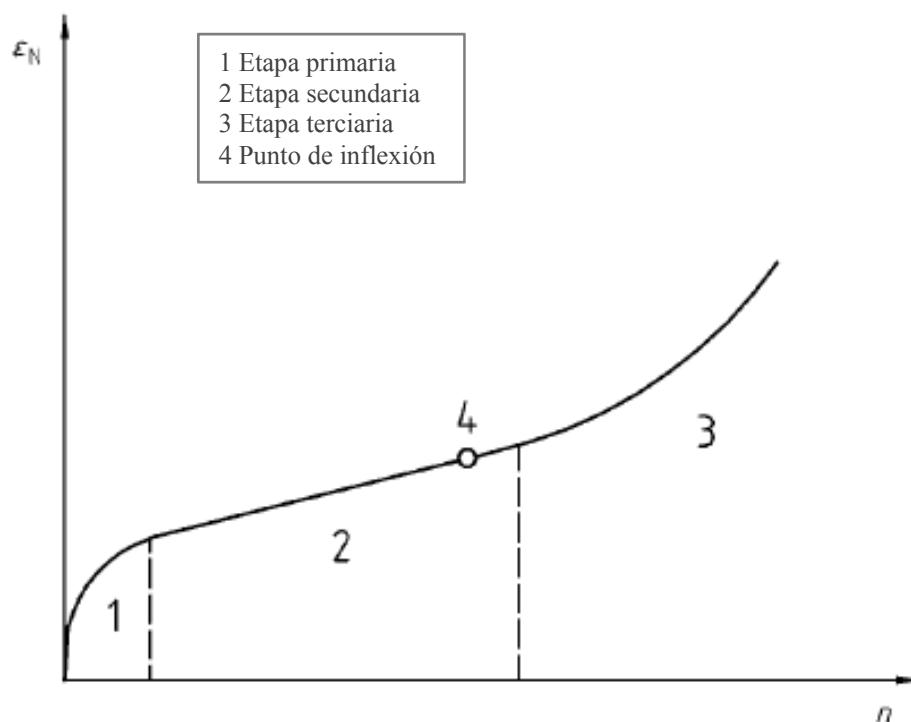


Figura 8.11.- Curva típica de fluencia (deformación axial acumulada en función del número de aplicaciones de la carga). Fuente: AENOR (2006d).

Puesto que en el RLAT la carga es relativamente pequeña y únicamente se aplican 1.800 ciclos de carga, no se suele producir el fallo de la probeta durante la realización del ensayo (He y Wong, 2007). Es decir, no se suele alcanzar el punto de inflexión y, por tanto, tampoco se obtiene el *Flow Number*. Por ello, para cuantificar la resistencia a la deformación permanente con este ensayo se utilizan los siguientes parámetros: la deformación axial permanente acumulada al final del ensayo y la pendiente de la curva de fluencia (Cooper Technology, 2006). En este sentido, cabe comentar que algunos investigadores (He y Wong, 2007) indican que entre los ciclos 600 y 1.800 se produce una relación lineal entre la deformación axial permanente acumulada y el número de aplicaciones de la carga. Así, a efectos del cálculo de la pendiente de la curva de fluencia, estos investigadores consideran los dos tercios finales de la curva. Además, He y Wong (2007) indican que cuanto mayor es la pendiente de los dos tercios finales de la curva de fluencia menor será la resistencia de las mezclas a la deformación permanente. En la presente tesis también se ha comprobado que es adecuado calcular la pendiente de la curva de fluencia entre los ciclos 600 y 1.800.

No se han encontrado especificaciones relativas a ninguno de los dos parámetros analizados (deformación axial acumulada final y pendiente de la curva de fluencia), por lo que su análisis servirá exclusivamente para comparar unas mezclas con otras. Sin embargo, sí se han encontrado especificaciones para otros materiales y para otras condiciones de realización del RLAT y para otros tipos de ensayo uniaxial bajo cargas repetidas. Así, Widyatmoko (2008) indica que valores de la deformación axial permanente acumulada superiores al 2% en el RLAT a 40°C y tras 3.600 ciclos de carga dan lugar a mezclas susceptibles a la deformación permanente. Widyatmoko (2008) indica que este valor está sancionado por la experiencia en UK. También la norma UNE-EN 12697-25 (AENOR, 2006d) indica que si tras 3.600 ciclos de carga, la deformación axial acumulada obtenida con el ensayo de compresión cíclico a 40°C es superior al 4% hay que analizar si ya se ha producido el punto de inflexión, en cuyo caso, la mezcla habría fallado y además es preciso indicar el número de ciclos en el que se produce la deformación del 4%. Para mezclas recicladas en frío la normativa técnica del Condado de Kent (Kent County Council, 2005) considera que la deformación final en el RLAT debe ser como mucho de un 1,6%. Puesto que estas especificaciones son relativas a ensayos, materiales o condiciones diferentes a las del ensayo realizado, no son de aplicación en el caso de la presente tesis. Sin embargo, se han considerado simplemente para obtener un orden de magnitud. Puesto que el valor utilizado en el Condado de Kent se refiere al mismo tipo y condiciones de ensayo, parece ser el más adecuado. Aunque hay que utilizarlo con precaución, pues está pensado, como se acaba de comentar, para un material diferente al investigado en la presente tesis.

En las figuras 8.12 a 8.15 se representa la deformación permanente acumulada en función del número de ciclos de carga para los diferentes pretratamientos aplicados. En un primer tramo, es decir, durante los primeros 600 ciclos de carga, como es habitual en este tipo de curvas, se produce una deformación muy acusada debida a una rápida densificación inicial de la mezcla. En un segundo tramo, aproximadamente entre los ciclos 600 y 1.800, se produce una relación lineal entre el número de ciclos y la deformación permanente acumulada. En este segundo tramo, la densificación ya no se produce de forma tan rápida.

Como puede verse en las figuras 8.12 a 8.15, no ha llegado a alcanzarse ni el punto de inflexión, ni la etapa terciaria de la curva de fluencia. Por tanto, durante la realización del ensayo no se ha llegado a producir el fallo de las probetas. Además, en las mezclas analizadas solo se ha producido densificación, es decir, no ha llegado a producirse flujo

plástico.

Como se comentó anteriormente, se van a analizar dos parámetros: en primer lugar, la deformación axial permanente acumulada al final del ensayo y, en segundo lugar, la pendiente de la curva de fluencia entre los ciclos 600 y 1.800. Respecto a la deformación axial permanente acumulada al final del ensayo, puede verse en las figuras 8.12 a 8.15, que no puede establecerse ninguna correlación entre su valor y el porcentaje de AR. Esto es así tanto para los pretratamientos aplicados (4 horas de reposo en estufa, 2 horas de reposo en estufa y preenvuelta del AR con ECL-2d) como para la mezcla de control (0 horas de reposo en estufa). Así, por ejemplo, las mayores deformaciones para las mezclas fabricadas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa y contenido óptimo de ligante se producen para el 20% de AR (figura 8.12a); para el 3,5% de ligante se producen con el 10% de AR (figura 8.12b), para el 4% de ligante con un 30% de AR (figura 8.12c) y para el 4,5% de betún con un 0% de AR (figura 8.12d). Además tampoco se observa una tendencia clara que relacione las deformaciones con el contenido de ligante. Así, por ejemplo, las mezclas fabricadas con un 20% de AR preenvuelto con ECL-2d y un 3,5% de ligante (figura 8.15a) presentan una menor deformación que las fabricadas con un 4,0% de ligante (figura 8.15b). Por el contrario, con el mismo pretratamiento, las fabricadas con un 30% de AR presentan mayores deformaciones con un 3,5% de ligante (figura 8.15a) que con un 4,0% (figura 8.15b).

Respecto al análisis de la deformación permanente acumulada en el ciclo 1.800, cabe comentar que en ningún caso se alcanza el valor de 1,6%. Cabe recordar que este valor es el límite especificado por la normativa técnica del Condado de Kent (Kent County Council, 2005) para mezclas recicladas en frío. Por tanto, aunque no sería de aplicación en este caso, sí puede dar una idea de que las deformaciones alcanzadas no parecen ser excesivas en ningún caso.

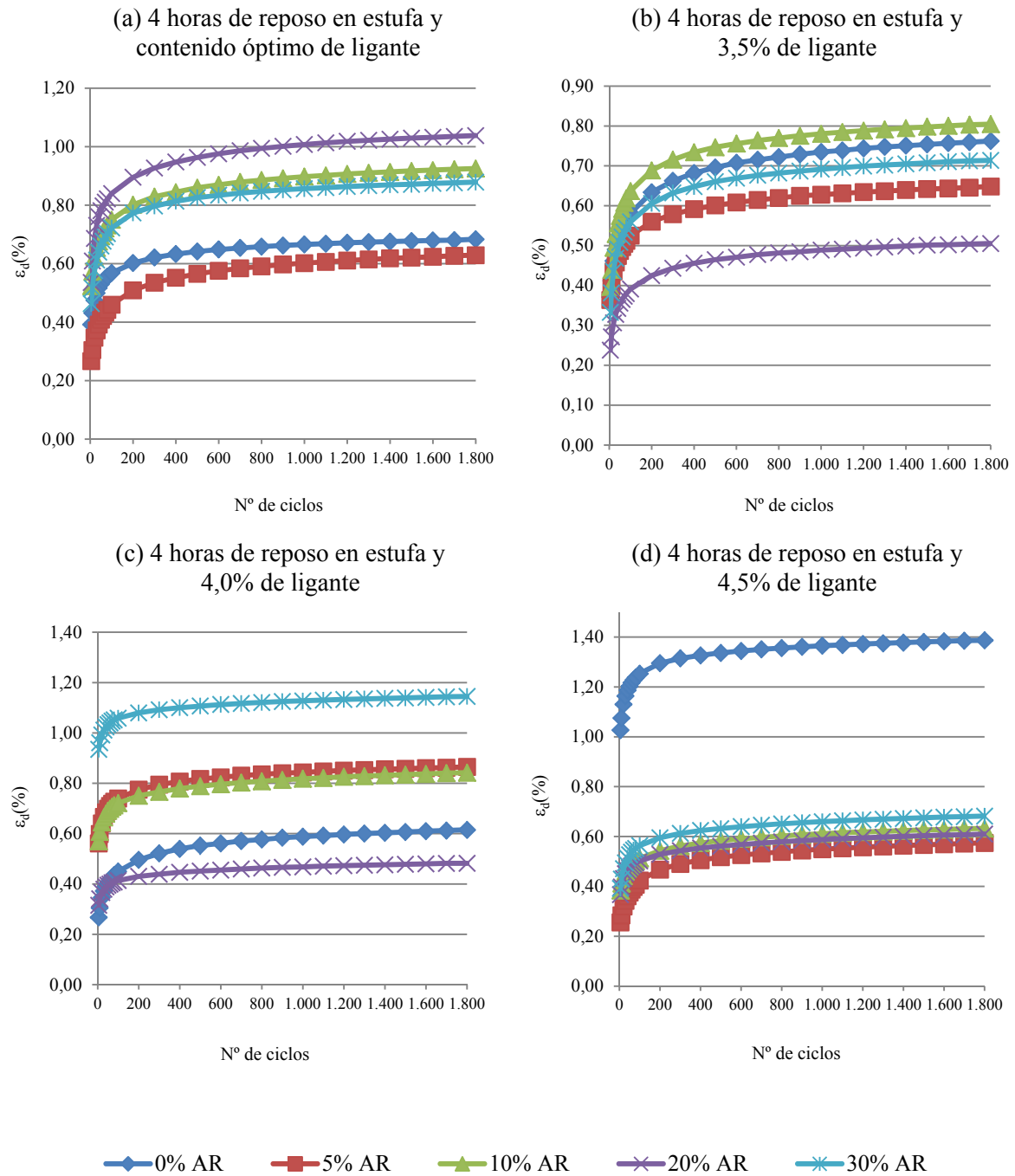


Figura 8.12.- Deformación axial permanente acumulada en función del número de ciclos de carga para las mezclas que se han fabricado con 4 horas de reposo en estufa: (a) Óptimo de ligante, (b) 3,5% de ligante, (c) 4,0% de ligante y (d) 4,5% de ligante.

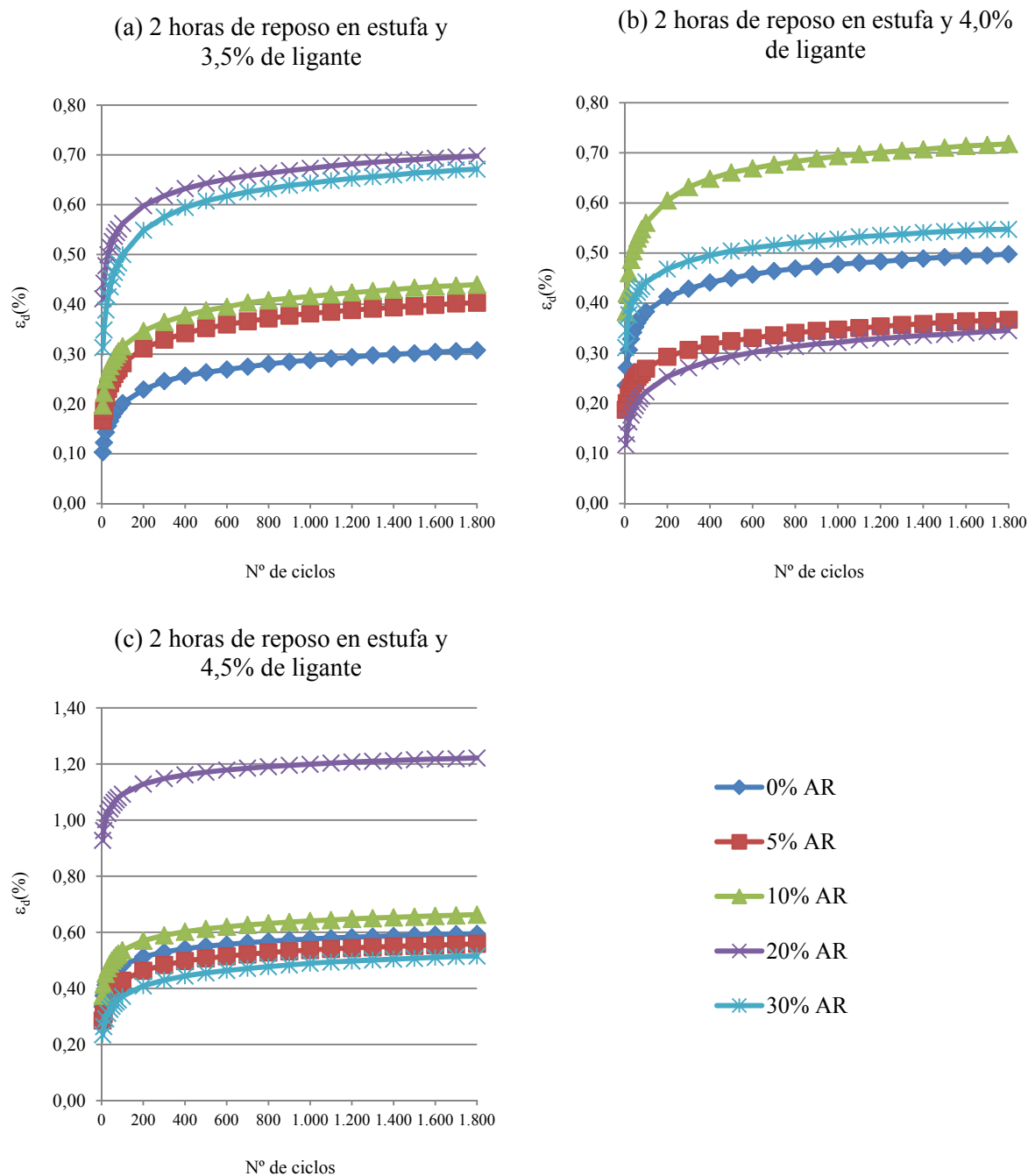


Figura 8.13.- Deformación axial permanente acumulada en función del número de ciclos de carga para las mezclas que se han fabricado con 2 horas de reposo en estufa: (a) 3,5% de ligante, (b) 4,0% de ligante y (c) 4,5% de ligante.

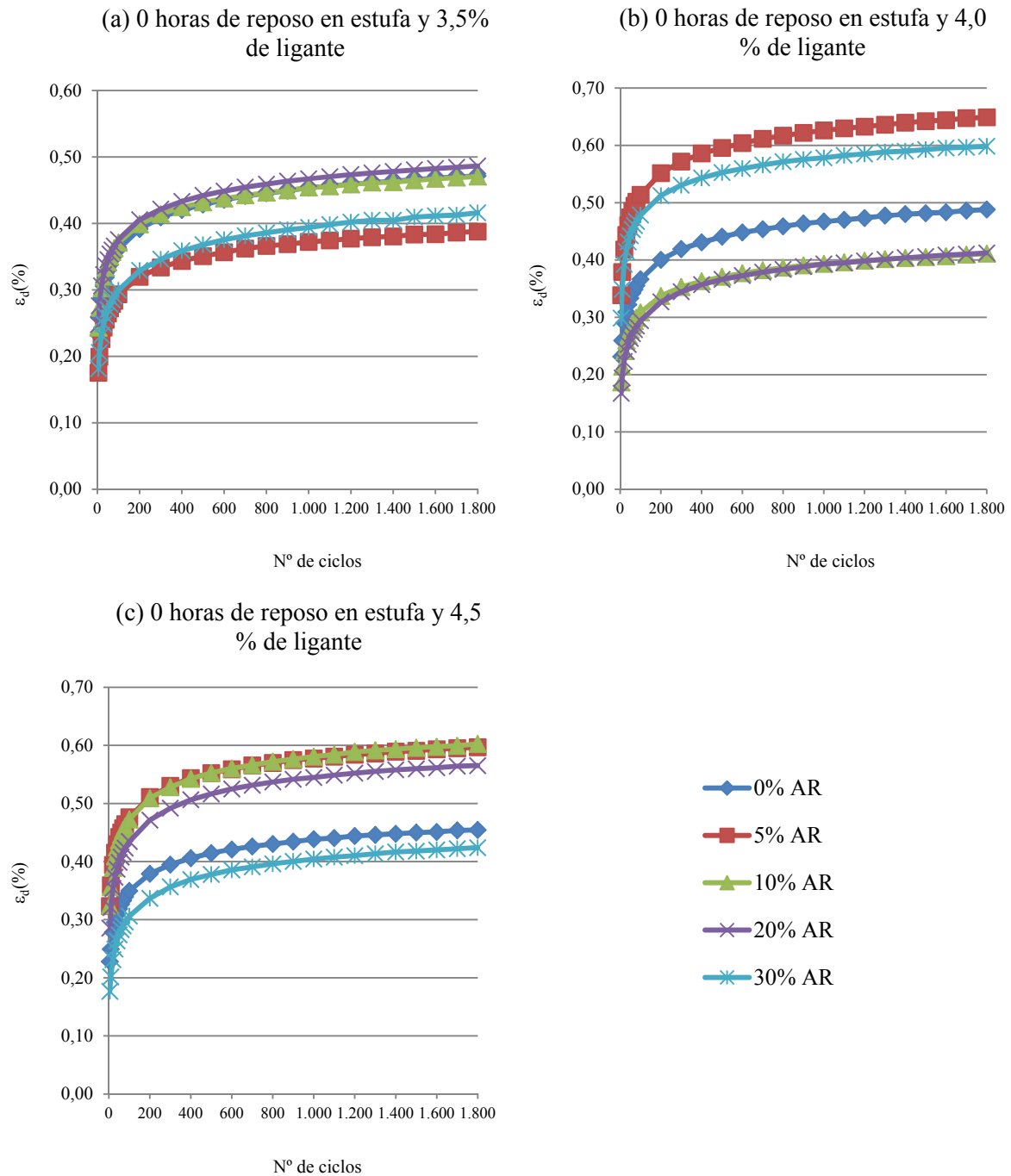


Figura 8.14.- Deformación axial permanente acumulada en función del número de ciclos de carga para las mezclas que se han fabricado con 0 horas de reposo en estufa: (a) 3,5% de ligante, (b) 4,0% de ligante y (c) 4,5% de ligante.

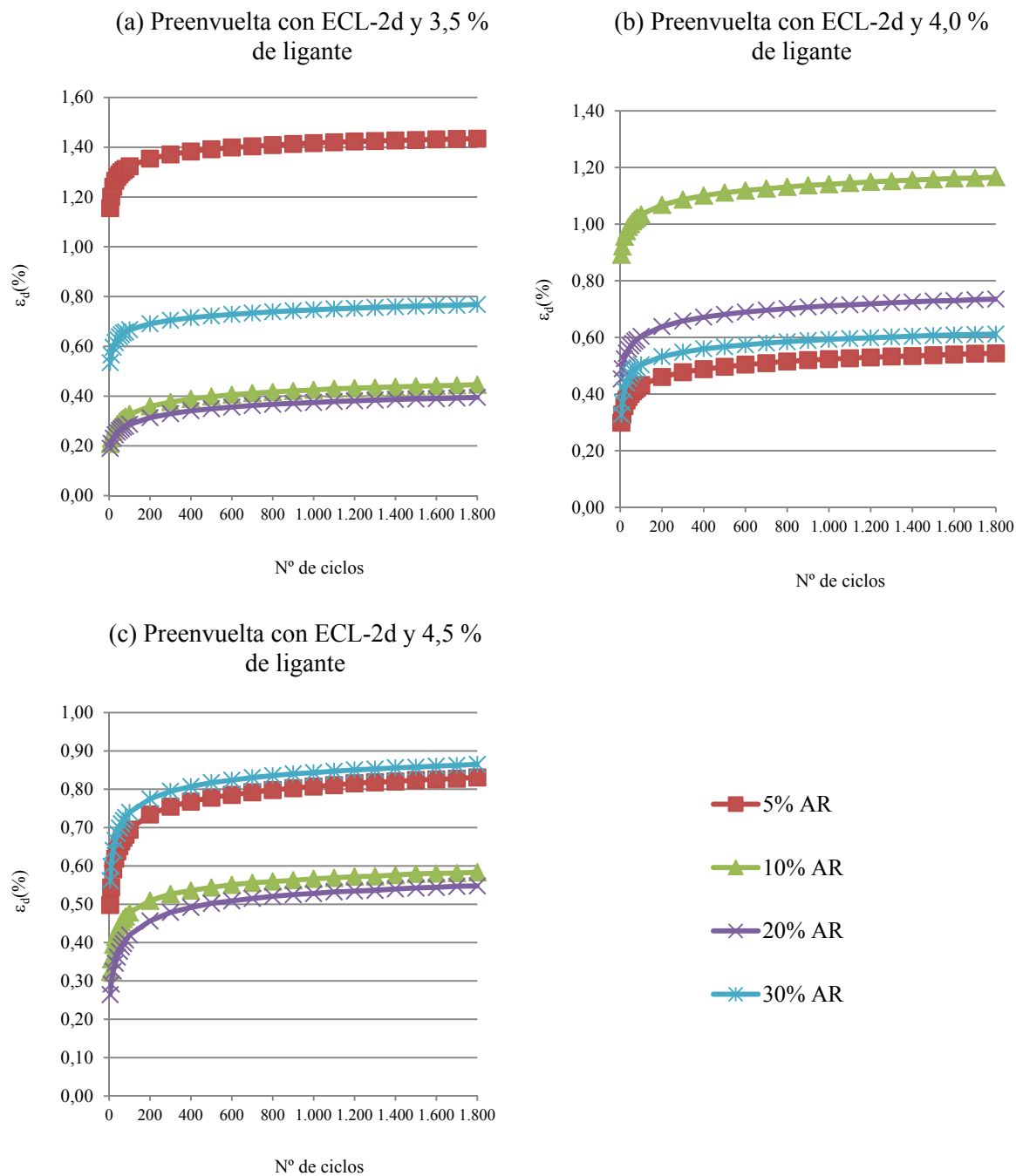


Figura 8.15.- Deformación axial permanente acumulada en función del número de ciclos de carga para las mezclas que se han fabricado con AR preenvuelto con ECL-2d: (a) 3,5% de ligante, (b) 4,0% de ligante y (c) 4,5% de ligante.

En la figura 8.16 se representa la deformación axial permanente alcanzada en el ciclo final (ciclo 1.800) para los 4 pretratamientos ensayados (4 horas de reposo en estufa, 2 horas de reposo en estufa, 0 horas de reposo en estufa o sin pretratamiento y preenvuelta del AR con ECL-2d) y los tres contenidos de ligante ensayados en común en todos los casos (3,5%, 4,0% y 4,5%).

A la vista de la figura 8.16 cabe señalar que, a pesar de que las mezclas que se han dejado reposar 4 horas y 2 horas en estufa presentan un peor comportamiento frente a las deformaciones permanentes, su deformación permanente final, es decir, la alcanzada en el ciclo 1.800 es **similar a la habitualmente obtenida** por otros investigadores en mezclas convencionales, con el mismo tipo de ensayo. Así por ejemplo, Santagata et al. (2007) obtuvieron valores de la deformación permanente final en el ciclo 1.800 de entre 0,4% y 1,1% para mezclas en caliente realizadas con diferentes ligantes, mientras que Aschury et al. (2009) obtuvieron valores de aproximadamente 1,3% para mezclas convencionales en caliente. Salvo alguna excepción aislada, todas las probetas ensayadas presentan valores de la deformación permanente inferiores a 1,3% en el ciclo 1.800. Además, como ya se comentó anteriormente, la deformación final es inferior al 1,6% especificado por la normativa técnica del Condado de Kent (Kent County Council, 2005) para mezclas recicladas en frío.

En la figura 8.16 también puede observarse lo siguiente:

- La deformación final alcanzada por las mezclas fabricadas con ECL-2d es bastante variable en función del porcentaje de AR y de ligante ensayado. Con 4 horas y 2 horas de reposo no hay tanta variabilidad en función del porcentaje de AR empleado, excepto para el contenido de ligante más elevado (4,5%).
- Para el 3,5% de ligante (figura 8.16a) la deformación final alcanzada es mayor cuanto mayor es el tiempo de reposo en estufa.
- Para el 4,0% de ligante (figura 8.16b), en todos los porcentajes de AR ensayados (0%, 5%, 10%, 20% y 30%), la deformación alcanzada en las mezclas con 4 horas de reposo en estufa es bastante mayor que la alcanzada para 2 y 0 horas de reposo en estufa. Para 2 horas y 0 horas de reposo en estufa se alcanzan deformaciones muy similares.

- Para el 4,5% de ligante (figura 8.16c), la deformación de las mezclas con 2 horas de reposo en estufa es superior a la deformación final alcanzada para las mezclas con 0 horas de reposo en estufa. Sin embargo, con 4 horas de reposo en estufa, la deformación es mayor que para 2 horas y 0 horas solo para el 0%, el 5% y el 30% de AR. En el resto de los casos (10% y 20% de AR) es menor.
- La deformación final alcanzada por las mezclas fabricadas con AR preenvuelto con ECL-2d es en general superior a la deformación alcanzada por las probetas sin pretratamiento (0 horas), salvo en casos puntuales.
- La deformación final alcanzada por las mezclas fabricadas con AR preenvuelto con ECL-2d algunas veces es superior a la alcanzada por las probetas que se han dejado reposar 4 y 2 horas en estufa y otras veces es inferior.
- Por tanto, como puede verse, los pretratamientos aplicados (4 horas de reposo en estufa, 2 horas de reposo en estufa y preenvuelta con ECL-2d) dan lugar a mezclas más susceptibles a presentar deformaciones permanentes que las mezclas sin pretratamiento (0 horas de reposo en estufa).

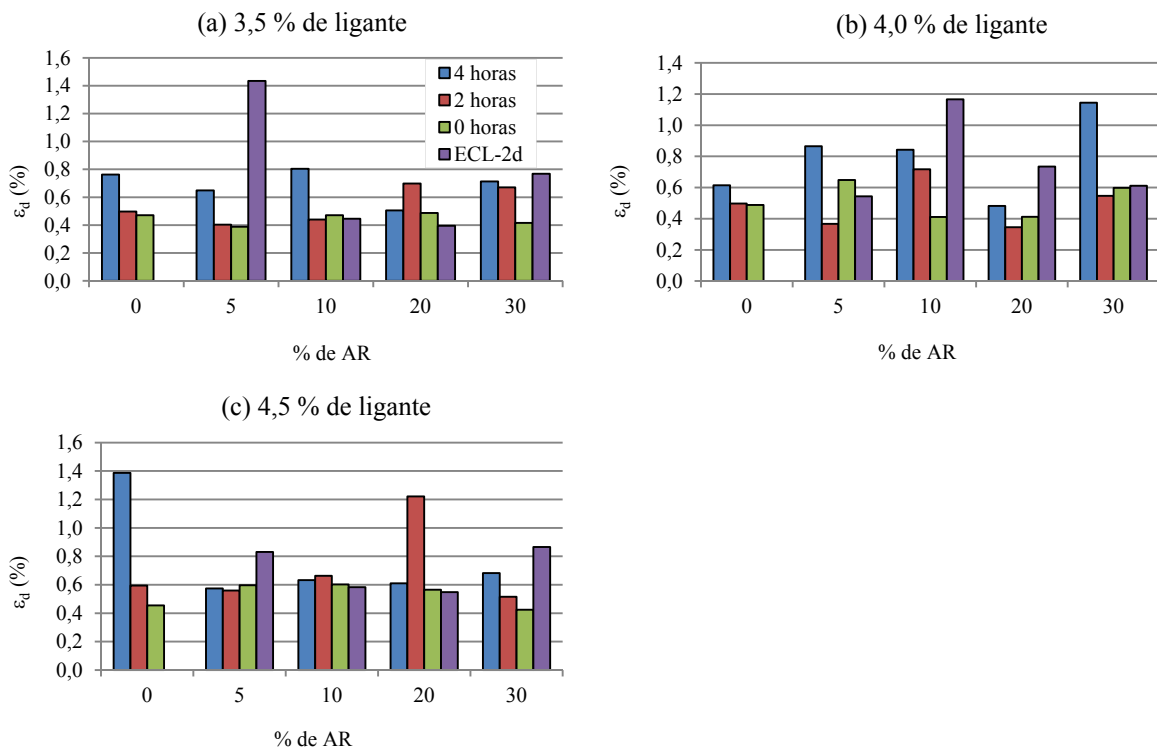


Figura 8.16.- Deformación axial permanente en el ciclo final en función del porcentaje de AR y del pretratamiento aplicado: (a) 3,5% de ligante, (b) 4,0% de ligante y (c) 4,5% de ligante.

Como se ha indicado anteriormente, también resulta de interés analizar la pendiente de la curva de fluencia entre los ciclos 600 y 1.800, pues da una idea de la velocidad de deformación de la probeta una vez finalizada la densificación de la etapa inicial. Así, a mayor pendiente, mayor velocidad de deformación y menor resistencia a la deformación permanente. Puesto que en las figuras 8.12 a 8.15 es difícilmente perceptible el menor o mayor valor de las pendientes entre los ciclos 600 a 1.800, se ha realizado la figura 8.17 en la que se muestra el valor de la pendiente en función del porcentaje de AR para cada contenido de ligante y cada pretratamiento. Este valor se ha calculado a partir de la siguiente expresión:

$$pd = \frac{\varepsilon_{d,(1.800,30)} - \varepsilon_{d,(600,30)}}{1.200} \quad (8.3)$$

donde:

- pd = pendiente media de la curva de fluencia entre los ciclos 600 y 1.800 (%/ciclo).
- $\varepsilon_{d,(1.800, 30)}$ = deformación axial permanente tras 1.800 aplicaciones de la carga a la temperatura de 30°C (%).
- $\varepsilon_{d,(600, 30)}$ = deformación axial permanente tras 600 aplicaciones de la carga a la temperatura de 30°C (%).

En la figura 8.17 puede observarse como, en general, en las mezclas bituminosas fabricadas con AR no hay una relación directa entre la resistencia a la deformación permanente y el contenido de AR. Pero hay alguna excepción. Así, en la figura 8.17 (a) se ve cómo con el contenido óptimo de ligante la pendiente de deformación va aumentando a medida que crece el contenido de AR en la mezcla. Aunque esta tendencia se mantiene solo hasta el 20% de AR. También puede observarse como para el 4,5% de ligante la pendiente media de deformación prácticamente no varía con el contenido de AR, salvo en el caso del 5% de AR. Además puede apreciarse como, en general, con el contenido óptimo de ligante las pendientes son mayores que para el resto de los contenidos (excepto en el caso del 0% de AR).

En la figura 8.17 (b) pueden verse las pendientes medias de deformación entre los ciclos 600 y 1.800 para mezclas que se han dejado reposar 2 horas en estufa. En este caso, para el contenido más bajo de ligante (3,5%), a medida que aumenta el contenido de AR también lo hace la pendiente de deformación. Sin embargo para los contenidos de ligante más

elevados (4,0% y 4,5%) esta tendencia no se mantiene.

En las figuras 8.17 (c) y 8.17 (d) se representa respectivamente la pendiente media de deformación frente al contenido de AR para la mezcla de control (0 horas de reposo en estufa) y para la mezcla en la cual el AR se sometió a una preenvuelta con ECL-2d. En ambos casos tampoco se aprecia ninguna tendencia clara de la relación entre la deformación permanente y el contenido de AR. Lo que sí puede apreciarse es que, en la **mezcla de control** y en la **mezcla pretratada con ECL-2d**, las **pendientes medias de deformación** son inferiores a las de las mezclas pretratadas con 4 horas y 2 horas de reposo en estufa (figuras 8.17a y 8.17b).

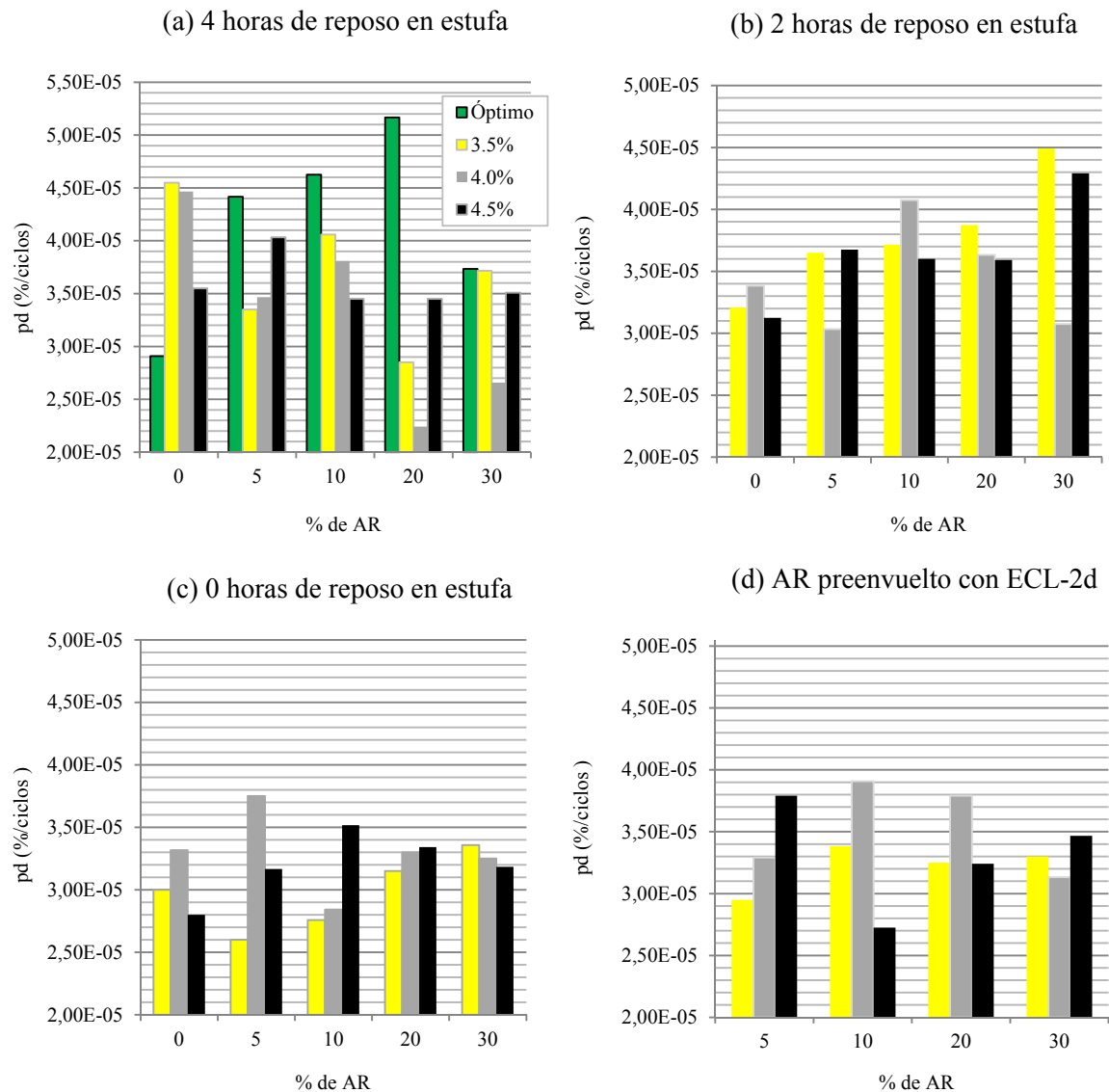


Figura 8.17.- Pendiente media de deformación entre los ciclos 600 y 1.800 en función del porcentaje de AR: (a) 4 horas de reposo, (b) 2 horas de reposo, (c) 0 horas de reposo y (d) Preenvuelta del AR con ECL-2d.

A la vista de los resultados puede concluirse que las mezclas que se han dejado reposar en estufa presentan mayores pendientes de deformación que la mezcla de control y las mezclas pretratadas con ECL-2d. Además, aunque en general no se aprecia ninguna tendencia de la deformación con el contenido de AR, puede decirse que para el contenido óptimo de ligante y con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, a medida que aumenta el contenido de AR disminuye la resistencia a las deformaciones permanentes, por lo menos hasta el 20% de AR.

Consecuentemente, las mezclas fabricadas con reposo en estufa, parecen presentar una menor resistencia a la deformación permanente. Por tanto, se tiene que, por un lado, el módulo resiliente es mayor en las mezclas que se han dejado reposar en estufa, mientras que, por otro lado, estas mezclas presentan una menor resistencia a la deformación permanente. Parece que hay una contradicción, ya que si el pretratamiento de reposo en estufa rigidiza la mezcla, debería dar lugar a mezclas con una mayor resistencia a la deformación permanente.

Sin embargo, esta aparente contradicción tiene una posible explicación. En este sentido, por un lado, como se vio en el Capítulo 7, la absorción de ligante da lugar a mezclas con un contenido de huecos de aire más elevado. El mayor porcentaje de huecos de aire que tienen las mezclas fabricadas con reposo en estufa hace que sea más fácil que se produzca una densificación de las mismas, ya que hay más espacio para realizar esta densificación. Por otro lado, como se acaba de ver, la corta duración y las bajas cargas aplicadas, provocan que no se alcance ni el punto de inflexión ni la etapa terciaria, en la que comienza el flujo plástico, durante la realización del RLAT. Es decir, únicamente se producen la etapa inicial y una parte de la etapa secundaria, en las que la deformación permanente ocurre por densificación. Por lo tanto, este ensayo no es representativo de la totalidad del comportamiento de las mezclas bituminosas ensayadas. Así, efectivamente se puede concluir que la densificación será mayor en las mezclas fabricadas con reposo en estufa, dando lugar inicialmente a unas mayores deformaciones permanentes, pues también es mayor el contenido de huecos de aire de las mismas. Sin embargo, no se puede afirmar que estas mezclas vayan a colapsar o a presentar flujo plástico con anterioridad a las mezclas pretratadas con emulsión o a las mezclas de control.

Con el fin de determinar si el porcentaje de AR, el pretratamiento aplicado y el contenido

de ligante tienen una influencia estadísticamente significativa en la resistencia a la deformación permanente, se ha llevado a cabo la realización de dos análisis ANOVA de tres factores (tablas 8.2 y 8.3). En el primer ANOVA (tabla 8.2) la variable independiente es la deformación axial permanente en el ciclo 1.800 obtenida a compresión uniaxial sin confinamiento bajo carga repetida. Los tres factores son: el porcentaje de AR (0%, 5%, 10%, 20% y 30%), el pretratamiento aplicado (reposo de 4 horas, 2 horas, 0 horas o sin pretratamiento y preenvuelta del AR con ECL-2d) y el contenido de ligante (3,5%, 4,0% y 4,5%). El pretratamiento aplicado es una variable cualitativa, mientras que la deformación permanente y el resto de los factores son variables cuantitativas.

En el segundo ANOVA (tabla 8.3) la variable independiente es la pendiente media de deformación entre el ciclo 600 y el ciclo 1.800 obtenida en el ensayo RLAT. Los tres factores son los mismos que en el primer ANOVA: el porcentaje de AR, el pretratamiento aplicado y el contenido de ligante.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: % de AR	5,86E+06	4	1,81	1,47E+06	0,28	0,8881
B: pretratamiento	6,88E+07	3	21,26	2,29E+07	4,41	0,0081
C: % de ligante	5,90E+06	2	1,82	2,95E+06	0,57	0,5704
Residuos	2,44E+08	47	75,44	5,19E+06		
Total (corregido)	3,24E+08	56	100,33			

Tabla 8.2.- ANOVA de tres factores para el análisis de la deformación permanente en el ciclo 1.800 a compresión uniaxial.

Fuente	SC	GL	% SCT	CM	F	p
Efectos principales						
A: % de AR	2,45E-03	4	1,9	6,12E-04	0,27	0,8934
B: pretratamiento	1,97E-02	3	15,4	6,56E-03	2,94	0,0428
C: % de ligante	3,35E-04	2	0,3	1,68E-04	0,08	0,9278
Residuos	1,05E-01	47	82,2	2,23E-03		
Total (corregido)	1,28E-01	56	99,8			

Tabla 8.3.- ANOVA de tres factores para el análisis de la pendiente media de deformación permanente en los ciclos 600 a 1.800 a compresión uniaxial.

En base a los resultados obtenidos puede verse que solo el pretratamiento aplicado es un factor significativo ($p < 0,05$). Este factor explica un 21,26% de la varianza total en el caso de la deformación permanente acumulada final (tabla 8.2) y un 15,4% de la varianza total en el caso de la pendiente media (tabla 8.3). Ni el contenido de ligante, ni el porcentaje de AR son significativos. Este resultado es acorde con las conclusiones obtenidas del análisis de las figuras 8.16 y 8.17: con pretratamiento (4 horas, 2 horas o preenvuelta del AR con ECL-2d) se obtienen mezclas bituminosas en caliente más susceptibles a presentar deformación permanente debida a la densificación durante el comienzo de su vida útil que las mezclas sin pretratamiento (0 horas de reposo). De todas formas, a pesar de esta conclusión, también se ha visto que todas las mezclas analizadas presentan valores de la deformación permanente en el ciclo 1.800 similares a los encontrados por otros investigadores para mezclas convencionales. En este sentido, puesto que el RLAT no es de aplicación en España, el análisis de la pendiente media de deformación obtenido en el ensayo de rodadura es clave para determinar si las mezclas fabricadas con 4 horas de reposo en estufa cumplen con los requisitos especificados por el PG-3 para la resistencia a la deformación permanente.

8.3.2 Ensayo de rodadura (ensayo en pista de laboratorio)

Existe una gran variedad de ensayos de rodadura y son ampliamente utilizados para determinar la resistencia a las deformaciones permanentes en las mezclas bituminosas en caliente. En estos ensayos se mide la profundidad de la rodera que se forma en una probeta prismática sometida al paso repetido de una rueda cargada bajo una determinada temperatura de ensayo.

En la presente investigación se ha llevado a cabo el procedimiento de ensayo descrito en la norma UNE-EN 12697-22 (AENOR, 2008). Para ello, como se ilustra en la figura 8.18, se utilizó el dispositivo de tamaño pequeño aplicando el procedimiento B, en aire, a 60°C y con una duración de 10.000 ciclos. Se aplicó una carga de 714 ± 10 N. La frecuencia fue de $26,5 \pm 1,0$ ciclos cada 60 segundos. Las probetas rectangulares de 260x300 mm se compactaron mediante compactador de placa mediante energía controlada. El espesor medio de las probetas fue de 60 mm.

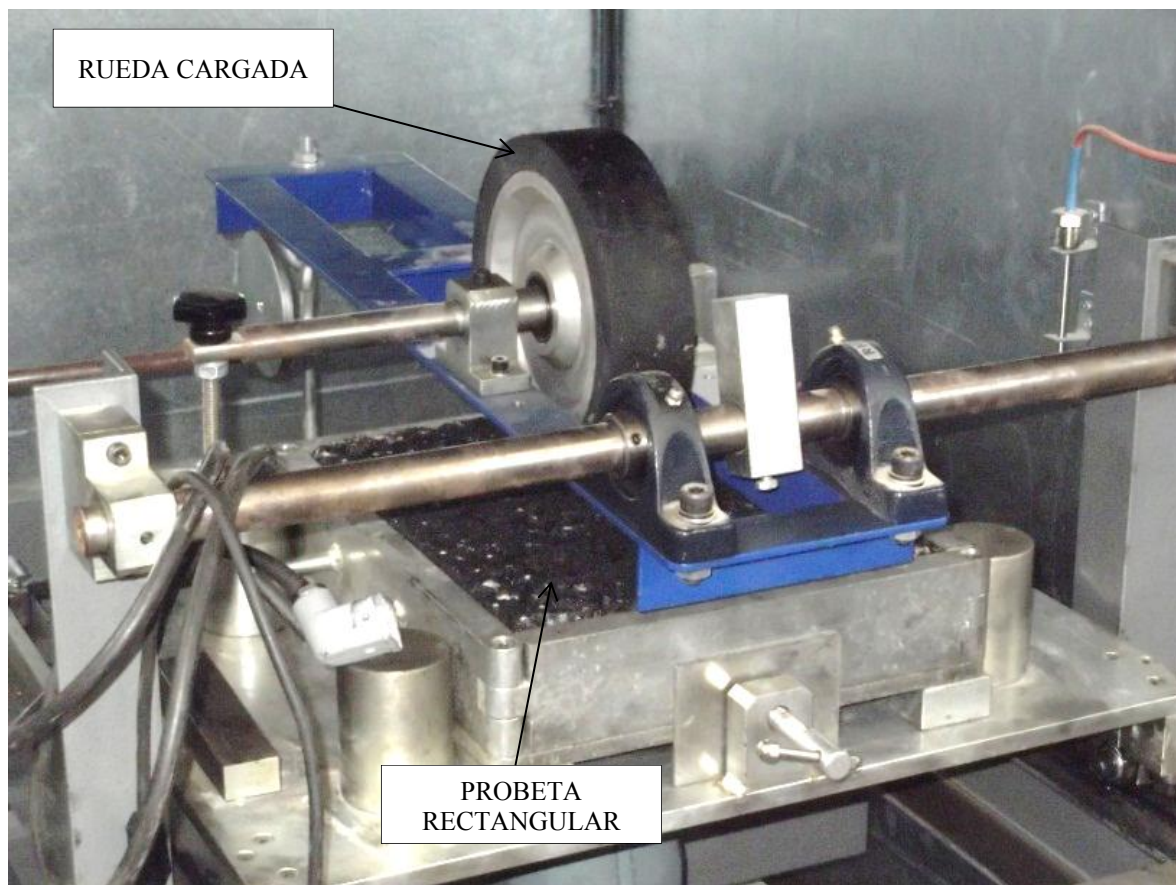


Figura 8.18.- Dispositivo pequeño del ensayo de pista de laboratorio. Probeta con un 5% de AR.

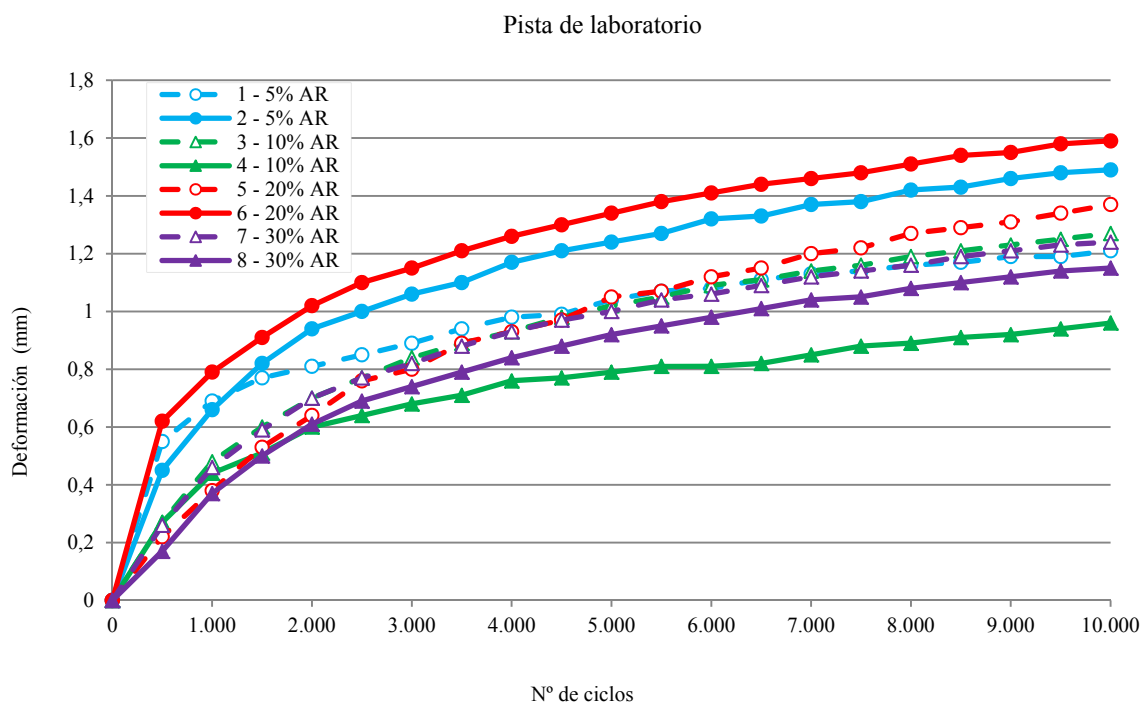


Figura 8.19.- Deformación en función del número de ciclos de carga en el ensayo de pista de laboratorio.

Este ensayo se llevó a cabo con mezclas bituminosas con el 5%, 10%, 20% y 30% de AR a las que se les aplicó el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. Todas ellas se dosificaron con los contenidos óptimos de ligante obtenidos en el ensayo Marshall. Se ensayaron dos probetas por cada porcentaje de AR. Se llevó a un gráfico la deformación acumulada en función del número de ciclos (figura 8.19) y se determinó la pendiente media de deformación de cada pareja de probetas entre los ciclos 5.000 a 10.000.

Del análisis de los valores obtenidos (tabla 8.4) puede concluirse que **todas las mezclas cumplen con los valores de pendiente media de deformación estipulados por el PG-3 para capas de base para cualquier zona térmica estival para categorías de tráfico pesado de T00 a T4**. Por tanto, aunque las mezclas fabricadas con 4 horas de reposo en estufa parecen presentar una mayor propensión a sufrir una densificación debido a su mayor contenido de huecos de aire, presentan una **satisfactoria resistencia a la deformación permanente**. Puede además observarse en la tabla 8.4, que la pendiente media de deformación aumenta con el incremento en el contenido de ligante, como era previsible.

En la figura 8.19 se adjuntan las curvas que relacionan la deformación (mm) con el número de ciclos de carga, para las ocho probetas ensayadas. Al igual que en el ensayo RLAT, no se observa correlación entre el porcentaje de AR y la deformación permanente final. Así, una de las probetas con el 20% de AR alcanza las mayores deformaciones; mientras que una con el 10% de AR obtiene las menores.

Probeta	1	2	3	4	5	6	7	8
AR (% s/árido)	5	5	10	10	20	20	30	30
Pretratamiento	4 horas de reposo en estufa							
Ligante (% s/mezcla)	3,8	3,8	3,9	3,9	4,4	4,4	4,3	4,3
Pendiente media de deformación (mm por cada 10 ³ ciclos de carga)	0,04		0,04		0,06		0,05	
Requisito PG-3: pendiente media de deformación (mm por cada 10 ³ ciclos de carga)	≤ 0,07							

Tabla 8.4.- Pendiente media de deformación en el ensayo de pista de laboratorio realizado sobre probetas fabricadas con el contenido óptimo de ligante y con reposo de 4 horas en estufa.

8.4 RESISTENCIA A LA FATIGA

8.4.1 Obtención de las leyes de fatiga

Para determinar las leyes de fatiga de las mezclas bituminosas se ha llevado a cabo el ensayo de tracción indirecta (*“Indirect Tensile Fatigue Test”*, ITFT, en la terminología anglosajona) descrito en el Anexo E de la norma UNE-EN 12697-24: 2006+A1 (AENOR, 2007e). Las probetas cilíndricas Marshall de 101,5 mm de diámetro y 63,5 mm de altura, compactadas mediante 75 golpes por cara, se colocaron en el utillaje para tracción indirecta (figura 8.20).

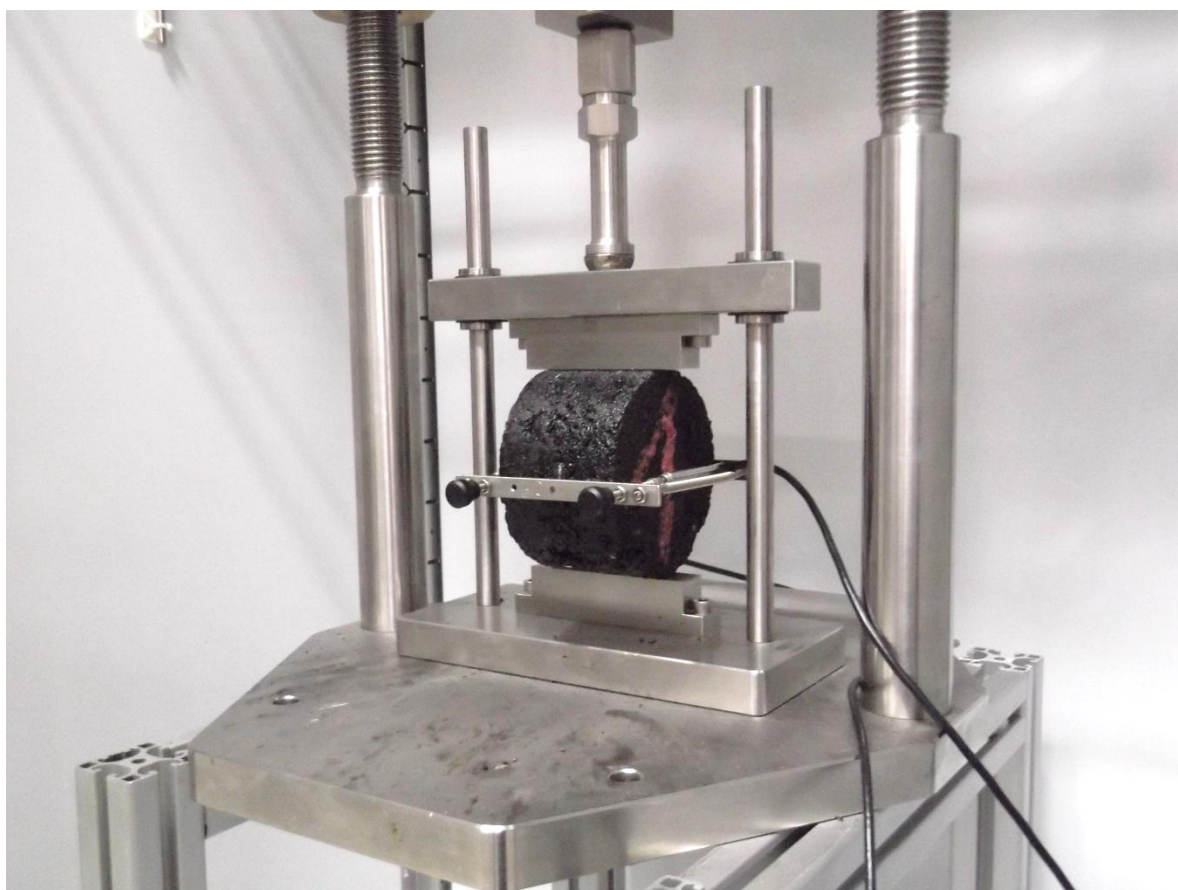


Figura 8.20.- Ensayo de tracción indirecta para determinar la fatiga de las mezclas bituminosas. Probeta con un 0% de AR, contenido óptimo de ligante y pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa.

Se trata de un ensayo a tensión controlada, es decir, se aplica una carga o tensión de amplitud constante, lo cual provoca una reducción de la rigidez de la mezcla, que se traduce en un incremento de la deformación con el número de repeticiones de la carga (Khalid, 2000; Huang, 2004). Estos ensayos se utilizan para evaluar mezclas bituminosas

dispuestas en capas de gran espesor, en las que la rigidez es el parámetro gobernante. En estos casos cuando mayor es la rigidez mayor es la vida esperada a fatiga (Khalid, 2000). Puesto que las mezclas que se han dejado reposar 4 horas en estufa presentan una gran rigidez, este ensayo es adecuado para el estudio de su vida a fatiga.

Como puede verse en la figura 8.21, en el ensayo se aplicó una carga repetida de medio senovertoso. El tiempo de carga fue de 0,1 segundos y el de descanso de 0,4 segundos. A pesar de que en este tipo de ensayo el criterio convencional indica que se produce el fallo cuando la deformación ha aumentado al doble del valor que tenía al principio del ensayo, se aplicaron cargas sobre la probeta hasta su total rotura. Esto se hizo así porque resultó evidente durante la realización del ensayo que el criterio convencional de fallo minoraba de forma excesiva la vida a fatiga de la mezcla.

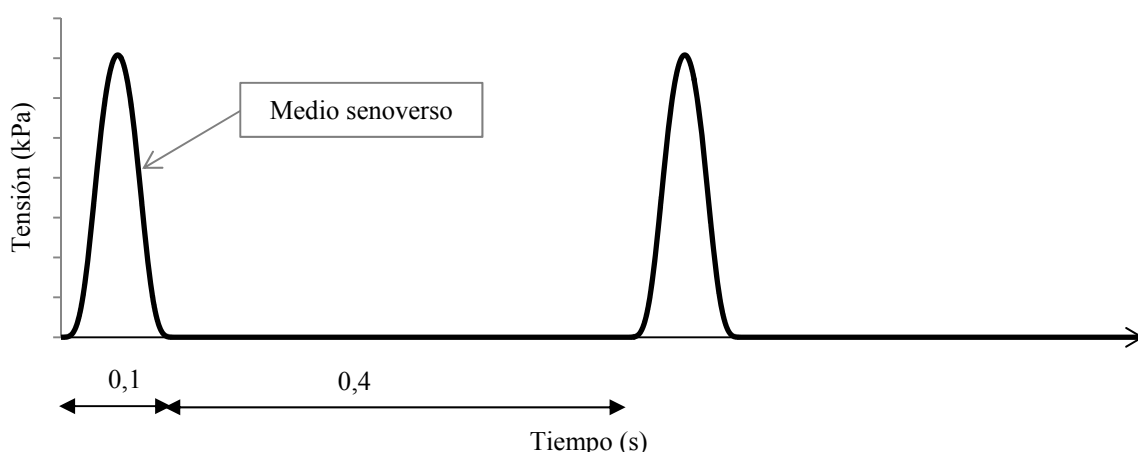


Figura 8.21.- Detalle de la carga repetida de medio senovertoso aplicada durante el ensayo de fatiga a tracción indirecta.

Además, durante la realización de este ensayo concurren una combinación de mecanismos de deformación permanente y fatiga (Cocurullo et al., 2008). Por tanto, se utilizaron dos criterios de fallo: o bien, como se acaba de indicar, el número de ciclos de carga hasta la completa rotura de la probeta o bien el número de ciclos de carga hasta que la deformación diametral alcanza un 10% del diámetro inicial de la probeta. El primero de los fallos en ocurrir, se adoptó como criterio de fallo.

Como puede verse en la tabla 8.5 se ensayaron mezclas fabricadas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, con 0%, 5%, 10%, 20% y 30% de AR, dosificadas con el contenido óptimo de ligante.

% AR	Bo (%)	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Nivel tensional (kPa)	Número de probetas
0	4,0	101,4	63,0	250	3
				350	3
				450	3
				550	3
5	3,8	101,5	63,2	350	4
				450	3
				550	3
10	3,9	101,4	63,9	350	4
				450	3
				550	3
20	4,4	101,4	64,2	350	4
				450	4
				550	3
30	4,3	101,4	64,3	350	3
				450	3
				550	4
Total					53

Tabla 8.5.- Probetas ensayadas a fatiga.

Además también se ensayó a fatiga una mezcla fabricada con el 0% de AR, con 0 horas de reposo en estufa y con el contenido óptimo de ligante determinado mediante el ensayo Marshall. Para esta mezcla de control, se ensayaron los siguientes tres niveles tensionales: 150 kPa (4 probetas), 250 kPa (3 probetas) y 350 kPa (3 probetas).

Como es sabido, la curva que representa la vida del firme frente a la amplitud de la carga aplicada (tensiones o deformaciones), se denomina curva de Wöhler. Esta ley de fatiga, para mezclas bituminosas, se caracteriza habitualmente por una relación del tipo (Di Benedetto y de la Roche, 1998):

$$\varepsilon = A.N^{-b} \quad (8.4)$$

donde:

- N = número de ciclos de carga hasta la fatiga.
- A, b = parámetros que definen la curva de Wöhler.
- ε = deformación unitaria aplicada de tracción en la fibra inferior de la mezcla bituminosa. Se utiliza como criterio de dimensionamiento.

Para determinar la ley de fatiga la norma indica que es preciso ensayar los tres niveles tensionales con un mínimo de tres probetas por nivel y de 10 a 18 probetas por ley. El ensayo se realizó a 20°C.

Como se ilustra en la figura 8.22, en ninguna de las probetas ensayadas se llegó a alcanzar la deformación vertical máxima fijada en un 10% del diámetro de la muestra. En todos los casos **la probeta se fracturó por un plano diametral vertical**, quedando separada en dos partes, por lo que el **mecanismo de fallo predominante** en el ensayo ITFT fue el de **fatiga**.



Figura 8.22.- Fallo por fatiga de una probeta de mezcla bituminosa en caliente fabricada con un 30% de AR y 4 horas de reposo en estufa.

A continuación (figura 8.23) se adjunta el gráfico en el que puede verse la deformación inicial (ϵ_0) frente al número de ciclos final (N_f). En el propio gráfico se adjuntan las ecuaciones de las leyes de fatiga ajustadas mediante regresión lineal.

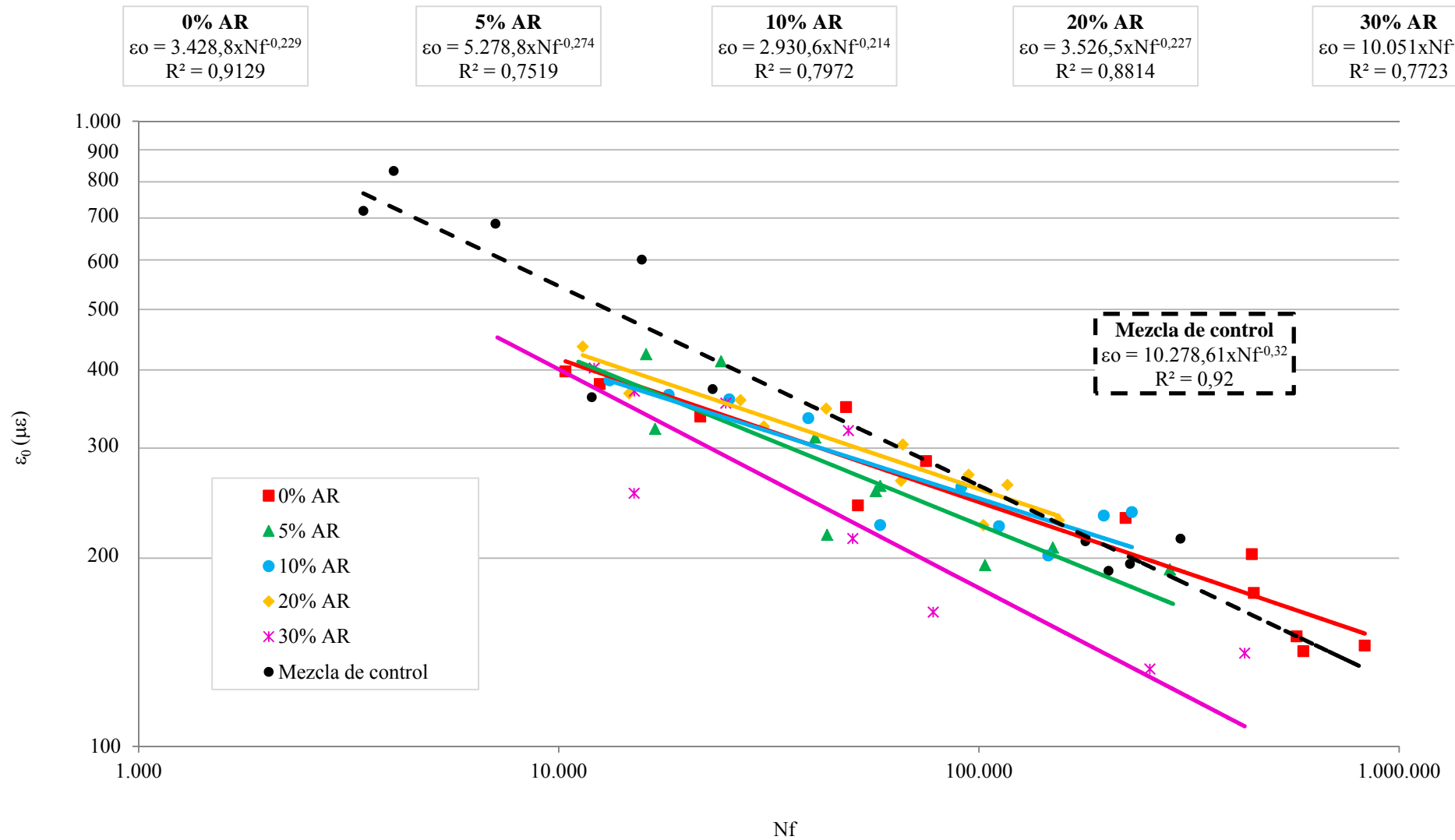


Figura 8.23.- Leyes de fatiga para mezclas con pretratamiento de 4 horas en estufa dosificadas con el óptimo de ligante.

En la figura 8.23 puede verse que:

- Las leyes de las mezclas fabricadas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa y con porcentajes de AR del 0%, 5%, 10% y 20% son muy similares, aunque la vida a fatiga de la mezcla con el 5% de AR es ligeramente inferior al resto.
- La mezcla con el 30% de AR es la que menos resiste a fatiga, presentando además una pendiente más acusada.
- La mezcla de control presenta una mayor vida a fatiga, salvo para los niveles de deformación más bajos. Cuando la deformación es baja, las mezclas con un porcentaje de AR del 0% al 20% presentan una mayor vida a fatiga que la de control. La mezcla con un 30% de AR ni siquiera para los niveles deformacionales más bajos presentaría una mayor vida a fatiga que la mezcla de control. Por tanto, las mezclas que contienen hasta un 20% de AR presentan una mejor vida a fatiga que las convencionales para niveles deformacionales bajos. A partir de un 30% de AR la vida a fatiga es peor que la de una mezcla convencional para cualquier nivel deformacional, razón de más para **limitar el contenido de AR en las mezclas bituminosas en caliente a un 30%.**

Además, cabe comentar que los coeficientes R^2 son bastante bajos. En particular, en las mezclas con porcentajes de AR del 5% al 30% varían entre 0,75 y 0,88; mientras que para las mezclas con un 0% de AR (y 4 horas o 0 horas de reposo en estufa) están más próximos a la unidad. Es decir, las curvas se ajustan mejor cuando no se utilizan ARs. Esto podría deberse a las heterogeneidades propias del AR.

8.4.2 Vida prevista de servicio

Utilizando las leyes de fatiga determinadas en el apartado anterior se ha analizado la vida prevista de servicio de las mezclas fabricadas con 4 horas de reposo en estufa y contenido óptimo de ligante. En el capítulo anterior se vio que las mezclas bituminosas de tipo AC 22 base G fabricadas con 4 horas de reposo en estufa y con los contenidos óptimos de ligante cumplían los requisitos de sensibilidad al agua y contenido de huecos para categorías de tráfico pesado hasta T00 (las de 0% de AR, 5% de AR, 20% de AR y 30% de AR) y hasta T1 (las de 10% de AR). Por tanto, para analizar la vida a fatiga, se han escogido dos

secciones de la Norma 6.1-IC “Secciones de firme” (Ministerio de Fomento, 2003): una para la categoría de tráfico pesado T00 y otra para la categoría de tráfico pesado T1. Las secciones escogidas fueron la 0032 y la 132. Dada la rigidez de las mezclas con reposo de 4 horas en estufa se consideró más adecuado utilizar secciones de tipo semirrígido para abordar su análisis.

Se utilizó un modelo multicapa elástico lineal (Huang, 2004) para determinar la deformación unitaria de tracción en la fibra inferior de la capa de base (ϵ_t). Como módulo de Young para la mezcla AC 22 base G se adoptó el módulo resiliente a 20°C determinado en el apartado 8.2. El resto de los módulos de Young y coeficientes de Poisson se extrajeron de la “Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía (Junta de Andalucía, 2007)”. Los parámetros necesarios para la introducción de datos pueden verse en la tabla 8.6.

Sección 0032				
Capa	Material	Espesor (cm)	E (MPa)	v
Rodadura	BBTM11B	3	4.000	0,35
Intermedia	AC 16 bin D	7	6.000	0,33
Base	AC 22 base G	15	8.890 (0% AR) 9.532 (5% AR) 10.826,5 (20% AR) 10.527 (30% AR)	0,35
Subbase	SC	30	8.000	0,25
Explanada	E3	∞	300	0,40
Sección 132				
Capa	Material	Espesor (cm)	E (kPa)	v
Rodadura	BBTM11B	3	4.000	0,35
Intermedia	AC 16 bin D	7	6.000	0,33
Base	AC 22 base G	10	10.316 (10% AR)	0,35
Subbase	SC	20	8.000	0,25
Explanada	E3	∞	300	0,40

Tabla 8.6.- Datos de entrada del programa KENPAVE

Para el cálculo del tráfico equivalente de proyecto (TP) se ha empleado la siguiente expresión (Junta de Andalucía, 2007):

$$TP = IMD_{PA} \cdot 365 \cdot \mu \cdot CE \cdot F \quad (8.5)$$

donde:

TP = Tráfico equivalente de proyecto. Número de ejes equivalentes de 13 t que es previsible que pasen por el carril de proyecto durante la vida útil del firme. Se ha adoptado un eje simple con rueda simple con presión de inflado de 0,8 MPa.

IMD_{PA} = Intensidad media diaria de vehículos pesados en el carril de proyecto en el año de puesta en servicio (ver valores adoptados en la tabla 8.6).

γ_t = Coeficiente de mayoración de las cargas. Adopta el valor 1,2 para las categorías de tráfico pesado de T00 a T1.

CE = Coeficiente de equivalencia. Para firmes semirrígidos adopta el valor 0,8.

F = Factor de crecimiento del tráfico de vehículos pesados:

$$F = \frac{(1+r)^n - 1}{r} \quad (8.6)$$

r: tasa de crecimiento. Su valor es 1,44 (Ministerio de Fomento, 2010).

n: período de proyecto en años (ver tabla 8.7).

El cálculo del TP y los resultados obtenidos con el programa KENPAVE pueden verse en la tabla 8.7. En el Anexo 4 se adjunta la salida de resultados del programa KENPAVE.

Sección de firme	% AR	ε _t (10 ⁻⁶ mm/mm) (*)	Nf	IMD _{PA} (vp/d)	n (años)	F	TP
0032	0	10,26	3,22x10 ¹⁰	8.000	40	53,5845	1,50x10 ⁸
0032	5	10,46	3,98x10 ⁸	8.000	40	53,5845	1,50x10 ⁸
132	10	13,14	5,24x10 ⁹	2.000	40	53,5845	3,76x10 ⁷
0032	20	10,75	2,09x10 ¹⁰	8.000	40	53,5845	1,50x10 ⁸
0032	30	10,69	4,43x10 ⁷	8.000	10	10,6735	2,99x10 ⁷

(*) Obtenida con el programa KENPAVE.

Tabla 8.7.- Vida previsible de las mezclas AC 22 base G fabricadas con distintos porcentajes de AR.

Como puede verse en la tabla 8.7 las mezclas fabricadas con AR resisten a fatiga durante un período de 40 años, excepto las fabricadas con un 30% de AR, que solo resistirían 10 años. Las de 0%, 5%, 20% y 30% de AR lo hacen para una categoría de tráfico pesado T00; mientras que las del 10% lo hacen para una categoría de tráfico pesado T1. Por tanto, puede decirse que, en general, las **mezclas fabricadas con 4 horas de reposo en estufa**, muestran una **vida a fatiga satisfactoria**, para **categorías de tráfico pesado elevadas**.

Capítulo 9

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

9.1. CONCLUSIONES

Las conclusiones finales, que ya han sido desarrolladas en cada uno de los correspondientes capítulos, se resumen a continuación ordenadas en bloques temáticos para facilitar su comprensión.

9.2. CONCLUSIONES RELATIVAS A LOS MATERIALES

9.2.1. Propiedades del AR

El AR con el que se ha llevado a cabo la presente investigación, tras su cuarteo, tamizado, lavado y secado, presentó unas características aceptables para utilizarlo combinado con árido natural en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente de tipo AC 22 base G para capas de base de carreteras, según las especificaciones del vigente PG-3. Además, se puede indicar lo siguiente sobre el AR:

- Se puede apreciar una cierta heterogeneidad en su composición y calidad, debido a que los RCD utilizados para su obtención proceden de edificaciones construidas con materiales de diversas calidades y orígenes. A pesar de ello, el AR utilizado está constituido en su mayor parte (89,3%) por hormigón, productos de hormigón, mortero y áridos. Por tanto, puede decirse que se trata de un AR de tipo hormigón.
- El resto de los constituyentes del AR son productos bituminosos (6,5%) e impurezas. Estas impurezas conviene eliminarlas en origen de cara a la fabricación de mezclas bituminosas en caliente, con el fin de evitar dispersiones en los resultados y mejorar el comportamiento de las mezclas.
- El AR presenta un LA elevado, lo cual hace que solo sea apto para fabricar mezclas bituminosas de categoría de tráfico pesado bajas, una T4. Por ello, de entre todos los áridos naturales estudiados se ha considerado adecuado escoger la corneana para fabricar mezclas bituminosas, por su excelente resistencia a la fragmentación. Así, el LA combinado del AR y la corneana arroja buenos valores, de tal forma que se pueden adoptar porcentajes de sustitución elevados sin que ello afecte al cumplimiento de esta propiedad. De todas formas, a pesar del cumplimiento del LA en el caso del árido combinado (natural y reciclado) es preciso tener en cuenta que el AR siempre constituirá una parte débil dentro del esqueleto mineral.

- Ha podido constatarse que, al igual que la absorción de agua, la absorción de ligante por parte del AR también es superior a la de los áridos convencionales. Por ello resulta fundamental considerar no solo la cantidad de ligante añadida a la mezcla, sino qué cantidad es efectiva y qué cantidad es absorbida. Considerar que todo el ligante es efectivo sobreestima tanto el contenido de huecos en el árido mineral como el contenido de huecos rellenos con ligante. Lo mismo pasaría en las mezclas convencionales, aunque eso sí, ocurriría en menor proporción ya que el AR es mucho más absorbente que el natural.
- Respecto a las caras de fractura, el AR tampoco cumple para categorías de tráfico pesado elevado (cumple para T3). Sin embargo, al igual que en el caso anterior, combinado con un árido adecuado podría ser apto para categorías de tráfico pesado superiores.
- La elevada absorción de la fracción fina del AR, unida a su mayor superficie específica y a su mayor sensibilidad a los fenómenos de adhesividad, ha motivado que la sustitución del árido virgen por el AR se realice en la fracción gruesa. En concreto, se ha empleado AR en la fracción 8/16 mm para los porcentajes de sustitución del 5%, 10% y 20% y en la fracción 8/16 y 4/8 en el caso del porcentaje de sustitución del 30%.
- El sílice (SiO_2) es el principal componente de todas las fracciones del AR, lo cual explica en parte su mala adhesividad pasiva con el ligante.
- Los tiempos de mezclado del AR con el ligante hasta alcanzar un recubrimiento del 100% son, como mínimo, del orden de 1,5 veces los tiempos de mezclado requeridos por los áridos naturales analizados. Esto da una idea de la dificultad para realizar la envuelta de los ARs. Es decir, la adhesividad activa del AR también es mala. La porosidad y rugosidad del mortero adherido, podrían explicar este comportamiento. También la presencia de impurezas podría influir en el tiempo de mezclado, al haber partículas más difíciles de envolver que otras.

9.2.2. Influencia del grado de penetración del betún en la afinidad entre el árido y el ligante

De forma general puede decirse que, cuanto mayor es la penetración del ligante, peores son los resultados obtenidos desde el punto de vista de la adhesividad pasiva. Es decir, es más fácil que, en presencia de agua y cuando actúa el tráfico, el ligante sea removido del árido. Sin embargo, ocurre a la inversa con la adhesividad activa, ya que cuanto mayor es la penetración del ligante, la menor viscosidad facilita que la envuelta se produzca de forma más rápida y eficaz. Por tanto, se puede considerar que la utilización del betún de penetración B50/70 para la fabricación de las mezclas bituminosa en caliente con AR y corneana es adecuada, ya que ofrece unos resultados intermedios de adhesividad activa y pasiva.

9.2.3. Influencia del polvo mineral en la afinidad entre el árido y el ligante

Aunque todos los polvos minerales estudiados han demostrado su efectividad, los mejores resultados de afinidad (adhesividad pasiva) se obtienen si se utiliza como polvo mineral el cemento de tipo CEM II/B-M (V-L) 32,5 N (cemento gris). Además, este polvo mineral presenta tiempos de mezclado (adhesividad activa) relativamente bajos en comparación con los otros polvos minerales investigados. Por todo ello, para mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente fabricadas con AR y árido natural se considera adecuado su empleo. Cabe señalar que el cemento gris ha mostrado otros beneficios adicionales, ya que también aumenta la estabilidad de la mezcla y la deformación de rotura obtenida en el ensayo Marshall.

Por el contrario, dados los resultados obtenidos del estudio de afinidad, no parece adecuado, de cara a mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas fabricadas con AR y árido natural, emplear el polvo mineral procedente del AR. Esta conclusión contradice las investigaciones de otros autores al respecto.

9.2.4. Influencia de la aplicación de pretratamientos en la afinidad entre el AR y el ligante

Para mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas en caliente fabricadas con AR se considera adecuado emplear algún tipo de pretratamiento. Los dos pretratamientos que mejores resultados han arrojado son:

- Realizar una preenvuelta del AR con un 5% de emulsión bituminosa ECL-2d y esperar hasta que se produzca la rotura de la misma antes de realizar la envuelta con el betún B50/70. Con este pretratamiento se consigue que la ECL-2d obstruya los poros del AR, impidiendo la entrada del agua. Además, la emulsión que recubre el AR puede colaborar a mejorar su afinidad química con el betún.
- Tras realizar la envuelta con el betún B50/70, antes de compactar, dejar reposar el árido en la estufa durante 4 horas a la temperatura de mezclado de 170°C. Con este pretratamiento se consigue que el AR absorba una mayor cantidad de ligante, mejorando así su adhesividad al permitir que toda la superficie del árido quede cubierta de ligante, sin dejar fisuras por las que entre el agua, y reducir la porosidad disminuyendo a su vez los huecos accesibles al agua. Ha podido comprobarse que no todas las partículas del AR absorben betún por igual, por lo que este pretratamiento no resultará igual de efectivo para todos los materiales contenidos en el AR.

Ambos pretratamientos han demostrado ser muy efectivos, tanto en los ensayos de afinidad como en los de sensibilidad al agua. En este sentido, no se puede afirmar que un pretratamiento sea más efectivo que el otro. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, podría ser más fácil adaptar las plantas de fabricación de mezcla bituminosa en caliente para llevar a cabo el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. Además, cabe comentar que la mezcla bituminosa sufre un proceso de transporte desde la planta de fabricación al tajo. Este tiempo de transporte podría considerarse incluido dentro de las 4 horas de pretratamiento. Sin embargo, el procedimiento de fabricación en planta también requiere una mayor investigación.

Es preciso señalar que también se han analizado otros tiempos de reposo en estufa, llegándose a la conclusión de que un tiempo de reposo de 2 o 3 horas podría ser suficiente

para mejorar la sensibilidad al agua de las mezclas fabricadas con AR. Sin embargo, se requiere una mayor investigación al respecto.

9.3. CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS.

Como se ha indicado anteriormente, la investigación se ha realizado con mezclas de tipo AC 22 base G con porcentajes de AR del 0%, 5%, 10%, 20% y 30% en las fracciones 8/16 mm y/o 4/8 mm. Se han fabricado las mezclas sin pretratamiento, con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa y con pretratamiento consistente en preenvuelta del AR con ECL-2d. Como resultado de la campaña de ensayos de laboratorio han podido extraerse una serie de conclusiones que a continuación se resumen.

9.3.1. Inestabilidad granulométrica

Como ya habían visto otros autores, se ha podido comprobar que el AR se fragmenta durante las operaciones de mezclado con el ligante y compactación, como consecuencia de la debilidad del mortero de cemento adherido y del procedimiento de compactación. Esta inestabilidad granulométrica también se da en las mezclas convencionales, aunque en menor medida. La aplicación del pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, no parece mejorar esta propiedad.

En este sentido, es conveniente limitar el porcentaje de sustitución del AR al 30% para evitar que, como consecuencia de la inestabilidad granulométrica, tras el proceso de mezclado y compactación, se obtengan granulometrías no incluidas en el huso granulométrico de la AC 22 base G.

9.3.2. Contenido de ligante y propiedades volumétricas

Ha podido comprobarse que las mezclas fabricadas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa demandan una mayor cantidad de ligante que las mezclas fabricadas sin pretratamiento o con el pretratamiento de preenvuelta del AR con ECL-2d. Esta mayor demanda de ligante de las mezclas fabricadas con 4 horas de reposo en estufa responde a la mayor absorción de ligante que se produce durante la permanencia de la mezcla en la estufa. Sin embargo, es preciso tener en cuenta en el cómputo final, el betún que introduce

la emulsión en las mezclas fabricadas con AR preenvuelto con ECL-2d: entre un 0% (mezclas con 0% de AR) y un 0,9% (mezclas con un 30% de AR) de betún adicional.

Además, tanto en el caso de las mezclas sin pretratamiento como en el caso de las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, se han obtenido los contenidos óptimos de ligante con el ensayo Marshall. Ha podido constatarse que, en ambos casos, a medida que aumenta el porcentaje de AR también aumenta el contenido de ligante óptimo (Bo). Otros investigadores han llegado a conclusiones similares. Sin embargo, aunque el contenido óptimo de ligante es mayor con el incremento del porcentaje de AR, también es mayor el porcentaje de ligante absorbido (Pba), por lo que finalmente el contenido de ligante efectivo (Pbe) es muy similar en ambos casos, aunque ligeramente inferior en las mezclas con pretratamiento. Estas tres tendencias tienen su explicación en que la elevada porosidad del mortero de cemento adherido al AR provoca una absorción de ligante proporcional a su porcentaje de participación en la composición de la mezcla bituminosa.

Tanto en el caso de las mezclas sometidas al reposo de 4 horas en estufa, como las mezclas fabricadas con AR preenvuelto con ECL-2d, se obtienen unos contenidos de huecos en mezcla y huecos en el árido mineral que las hacen aptas para categorías de tráfico pesado elevadas. Sin embargo, para un mismo contenido de ligante, las mezclas fabricadas con reposo en estufa de 4 horas, presentan un mayor volumen de huecos de aire y de huecos en el árido mineral que las mezclas fabricadas con AR preenvuelto con emulsión. La presencia de AR dificulta la compactación de las mezclas bituminosas en caliente, tanto más cuanto mayor es su porcentaje de participación en la mezcla, debido a que la mayor rugosidad del mortero de cemento adherido aumenta el rozamiento interno entre partículas de áridos, dificultando la compactación. Esto es especialmente evidente en el caso de las mezclas sometidas a pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, ya que al presentar una mayor absorción, también presentan un contenido de ligante efectivo más bajo, por lo que la compactación es más difícil.

9.3.3. Sensibilidad al agua, resistencia a tracción indirecta y deformación vertical de rotura

Ha podido comprobarse, tanto en los estudios de afinidad entre el árido y el ligante como en los estudios de tracción indirecta tras inmersión, que el AR de tipo hormigón procedente de RCD da lugar a mezclas con una mala resistencia a la acción del agua. Sin embargo, no

es peor que la de otros áridos naturales de utilización habitual en Galicia, donde abundan los áridos de tipo silíceo.

Por ello, el AR de tipo hormigón procedente de RCD puede mejorar o empeorar la resistencia a la acción del agua de las mezclas bituminosas en caliente en función del tipo de árido natural con el que se combine. Así con un árido natural que presente una mala sensibilidad al agua puede mejorar su sensibilidad; mientras que con un árido que presente una buena sensibilidad al agua puede empeorarla.

De todas formas, dado que la sensibilidad al agua del AR es mala, se ha visto la idoneidad de someter a las mezclas bituminosas en caliente para capas de base de carreteras fabricadas con sustitución parcial de AR a uno de los dos tratamientos anteriormente indicados: preenvuelta del AR con emulsión bituminosa y dejar reposar la mezcla suelta (antes de compactarla) en estufa a la temperatura de durante 4 horas.

Además de la utilización de alguno de los dos pretratamientos anteriormente descritos, también se ha visto la idoneidad de utilizar cemento gris como polvo mineral, ya que mejora la sensibilidad al agua de las mezclas bituminosas en general y de las fabricadas con AR en particular.

En el caso del pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa ha podido comprobarse que es especialmente efectivo cuanto mayor es el porcentaje de AR, ya que es más absorbente que el árido natural. Sin embargo, es preciso matizar que el mayor o menor éxito del pretratamiento también está influenciado por la cantidad de ligante empleado en la fabricación de las mezclas. Por tanto, se hace necesaria una adecuada dosificación para garantizar su éxito. En particular, contenidos de ligante muy bajos podrían dar lugar a que el pretratamiento no fuese efectivo, al no quedar garantizada una adecuada absorción del ligante.

Además, ha podido observarse que el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa produce mezclas con mayores resistencias a tracción indirecta que las obtenidas con el pretratamiento consistente en la envuelta con emulsión y que las obtenidas para las mezclas sin pretratamiento. De hecho, el satisfactorio comportamiento frente a la acción del agua del pretratamiento de reposo en estufa, viene dado por el mayor aumento que provoca en las resistencias a tracción indirecta en húmedo frente al aumento producido en

las resistencias a tracción indirecta en seco. También se ha visto que las mezclas sometidas al reposo de 4 horas presentan unas menores deformaciones verticales de rotura a tracción indirecta que las fabricadas con el AR preenvuelto con emulsión.

9.3.4. Estabilidad y deformación Marshall

Únicamente se han llevado a cabo ensayos Marshall sobre mezclas sin pretratamiento y mezclas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. Como resultado de estos ensayos ha podido verse que:

- Las mezclas sometidas al pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa presentan valores de la estabilidad Marshall elevados, muy superiores a los obtenidos para las mezclas sin pretratamiento. Además, presentan valores de la deformación Marshall bajos, aunque incluidos dentro del rango admisible por el antiguo PG-3. Aunque en general no tendría por qué haber problemas como consecuencia de una excesiva fragilidad o rigidez de la mezcla, se ha constatado que sí podría haberlos si se utilizan en carreteras de bajo tráfico.
- También ha podido observarse que el Módulo Marshall es mucho mayor en las mezclas que se han dejado reposar 4 horas en estufa que en las mezclas fabricadas sin pretratamiento. Por tanto, dejar reposar la mezcla en la estufa rigidiza la mezcla.
- Dados los resultados obtenidos estas mezclas deberían presentar una mayor resistencia a la deformación permanente que las mezclas sin pretratamiento.

9.3.5. Rigidez

Como era previsible, puede afirmarse que la temperatura es el factor que más influencia tiene en la rigidez de las mezclas bituminosas ensayadas. Sin embargo, es preciso puntualizar que la absorción de betún por parte del árido suaviza el efecto de la temperatura. Es decir, las diferencias entre los módulos obtenidos a distintas temperaturas son más notables cuanto menor es el tiempo de reposo en estufa.

En todos los casos, las mezclas bituminosas fabricadas con AR presentan una rigidez satisfactoria, tanto si se fabrican sin pretratamiento, como si se fabrican con alguno de los pretratamientos analizados. Sin embargo, ha podido observarse que dejar reposar la mezcla

en la estufa antes de su compactación rigidiza la mezcla, de tal forma que cuanto mayor es el tiempo de reposo en estufa, mayor es el incremento en la rigidez. Así, las mezclas fabricadas con el pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa presentan módulos de rigidez muy superiores a los de las mezclas convencionales, llegando a ser muy próximos a los de las MAM (mezclas de alto módulo). Este resultado es coherente con el aumento del Módulo Marshall que, como se ha visto, se da en este tipo de mezclas. A pesar de esta elevada rigidez, dada la climatología española, no deberían presentar problemas de fisuración ni siquiera en las zonas más frías. También el pretratamiento de preenvuelta del AR con emulsión rigidiza la mezcla, aunque en menor medida.

9.3.6. Resistencia a la deformación permanente

Se han ensayado con el RLAT (*Repeated Load Axial Test*) mezclas AC 22 base G fabricadas con 4 horas, 2 horas y 0 horas de reposo en estufa, con AR preenvuelto con emulsión y sin pretratamiento. Durante la realización del ensayo, ninguna de ellas llegó a fallar. Es decir, la deformación permanente solo llegó a producirse por densificación, sin llegar a aparecer ni el punto de inflexión de la curva de fluencia ni la deformación debida al flujo plástico. Ha podido comprobarse que las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, a pesar de su mayor rigidez, se densifican inicialmente más rápidamente que las otras mezclas, siendo atribuible este hecho al mayor contenido de huecos de aire de estas mezclas. Sin embargo, es preciso señalar que todas las mezclas ensayadas presentaron una satisfactoria resistencia a la deformación permanente.

Por otro lado, hay que puntualizar que el estudio de la deformación permanente se completó con el ensayo de pista de laboratorio para las mezclas con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa. En este caso se obtuvo que las mezclas AC 22 base G fabricadas con 4 horas de reposo en estufa, polvo mineral de cemento gris, contenido óptimo de ligante y porcentaje de AR del 5%, 10%, 20% y 30% cumplían con las especificaciones del PG-3 para el ensayo de pista para capas de base de cualquier zona térmica estival para categorías de tráfico pesado de T00 a T4.

9.3.7. Fatiga

Se han determinado las leyes de fatiga de las mezclas AC 22 base G fabricadas con 4 horas de reposo en estufa, polvo mineral de cemento gris, contenido óptimo de ligante y

porcentaje de AR del 0%, 5%, 10%, 20% y 30% y se han comparado con una mezcla de control (0% de AR y 0 horas de reposo en estufa). Ha podido comprobarse que la vida a fatiga de las mezclas es satisfactoria. En particular, hasta un porcentaje del 20% de AR, la vida a fatiga es similar a la de la mezcla convencional (mezcla de control); mientras que para el 30% de AR es ligeramente inferior. Por ello, el límite de sustitución del 30% de AR parece adecuado, ya que porcentajes superiores podrían dar lugar a mezclas con un comportamiento mecánico inadecuado.

9.4. RECOMENDACIONES

Se proponen las siguientes recomendaciones a la hora de utilizar AR en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente:

- Estudiar en profundidad cada tipo de AR cuando se plantee su utilización en mezclas bituminosas en caliente, ya que los ARs son muy heterogéneos.
- Utilizar AR de tipo de hormigón en mezclas bituminosas para carreteras en la capa de base, ya que las menores exigencias técnicas y el mayor consumo de áridos, derivan en beneficios técnicos y medioambientales.
- Emplear AR en la fracción gruesa, debido a la mayor absorción y sensibilidad al agua de la fracción fina, así como a la dificultad de retirar impurezas de la misma. Para el AR estudiado y mezclas de tipo AC 22 base G se considera adecuado utilizar las fracciones 8/16 mm y 4/8 mm.
- Limitar el porcentaje de AR a utilizar en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Para las de tipo AC 22 base G, sería conveniente no superar un 30% de AR. Porcentajes mayores podrían dar lugar a una inestabilidad granulométrica excesiva, a grandes consumos de ligante y a un deficiente comportamiento a fatiga.
- Utilizar polvo mineral CEM II/B-M (V-L) 32,5 N (cemento gris) para mejorar la sensibilidad al agua de la mezcla.
- Utilizar alguno de los dos pretratamientos analizados para mejorar la sensibilidad al agua de la mezcla (reposo de 4 horas en estufa a y preenvuelta del AR con un 5% de emulsión ECL-2d).

- Seleccionar adecuadamente el árido natural con el que combinar el AR. En particular, es preciso que el árido natural presente una adecuada resistencia a la fragmentación.
- Establecer recomendaciones sobre los tiempos de mezclado de este tipo de áridos. La dificultad encontrada para llevar a cabo su envuelta con el ligante, debido principalmente a la textura rugosa y a la porosidad aportadas por el mortero de cemento adherido, motivan esta recomendación. En laboratorio, con los ARs utilizados, mediante mezclado con mezcladora automática, son necesarios tiempos de mezclado de 2 minutos a 170°C con el betún B50/70.
- Emplear un mínimo de 10 probetas (no de 6 como indica la norma UNE-EN 12697-12) en los ensayos de tracción indirecta tras inmersión: 5 para el grupo seco y 5 para el grupo húmedo. Esto es así debido a las dispersiones relativamente grandes que, según se ha podido comprobar, introduce el AR en los resultados.
- Emplear las mezclas fabricadas con ARs y pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa en firmes semirrígidos, debido a que son más rígidas que las convencionales.
- Crear normativa técnica sobre la utilización de AR en mezclas bituminosas en caliente. En el momento de redacción de la presente tesis no existía normativa en España al respecto.

9.5. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

Como líneas de investigación futuras se plantean las siguientes:

- Completar los ensayos realizados. Así, sería conveniente realizar ensayos de tracción indirecta tras inmersión con otros porcentajes de ligante y los ensayos de fatiga con nuevos niveles tensionales. También sería oportuno obtener los contenidos óptimos de ligante mediante el Ensayo Marshall para el pretratamiento de preenvuelta del AR con ECL-2d. A partir de su conocimiento se podría estudiar la sensibilidad al agua, rigidez, resistencia a la deformación permanente y resistencia a la fatiga. Así mismo podrían analizarse otras propiedades mecánicas, tales como la fatiga a flexión en cuatro puntos y el módulo dinámico.

- Realizar un estudio similar al realizado, pero fabricando las mezclas con otros tipos de árido natural (por ejemplo, uno con una buena adhesividad) y con otros betunes (por ejemplo, un B35/50) ya sean modificados (siempre y cuando se modifiquen con un producto respetuoso con el medio ambiente) o sin modificar.
- Afinar los tiempos de reposo en estufa, para reducirlos lo máximo posible y colaborar así con el ahorro económico y energético. Como se ha visto, es posible que tiempos de reposo en estufa de entre 2 horas y 3 horas arrojen buenos resultados.
- Analizar empleo de la fracción fina para fabricar mezclas bituminosas en caliente, ya que esta fracción le confiere a la mezcla bituminosa menores heterogeneidades que la fracción gruesa, al ser el tamaño de árido menor.
- Considerar la aplicación de los ARs para mezclas bituminosas en frío.
- Analizar la posibilidad de emplear los ARs en otro tipo de mezclas (densas, semidensas, de alto módulo) y para otras capas (rodadura e intermedia).
- Los resultados y conclusiones obtenidos en la presente tesis son el resultado de la investigación realizada en laboratorio. Por ello, para profundizar en el conocimiento de las mezclas bituminosas fabricadas con AR de tipo hormigón procedentes de RCD sería conveniente:
 - Modelizar algunas secciones tipo con el fin de determinar posibles espesores a disponer en capas de base de carreteras.
 - Estudiar las posibles dificultades que pueden surgir durante el proceso de fabricación en planta.
 - Realizar tramos de prueba con las dosificaciones estudiadas y los espesores previstos para ver su comportamiento (durabilidad, deterioros, capacidad estructural, etc.) frente a las cargas de tráfico reales y a las solicitaciones climáticas.

Capítulo 10

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

10.1. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] AASHTO (1993). “Guide for design of pavement structures”. Washington, D.C.
- [2] Abo-Qudais, S.; Al-Shweily, H. (2007). “Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behaviour”. *Construction and Building Materials* 21, p. 1886-1898.
- [3] Abo-Qudais, S.; Mulqi, M.W. (2005). “New Chemical Antistripping Additives for Bituminous Mixtures”. *Journal of ASTM International* 2 (8), p. 87-97.
- [4] Adams, M.P. (2012). “Alkali-Silica Reaction in Concrete Containing Recycled Concrete Aggregates”. An Abstract of the thesis. Oregon State University.
- [5] AENOR (1997). UNE-EN 933-3:1997. “Determinación de la forma de las partículas. Índice de Lajas”.
- [6] AENOR (1998). UNE-EN 933-1:1998. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”.
- [7] AENOR (1999a). UNE-EN 933-5:1999. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso”.
- [8] AENOR (1999b). UNE-EN 1097-2:1999. “Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación”.
- [9] AENOR (2000). UNE-EN 933-8:2000. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente del arena”.
- [10] AENOR (2001). UNE-EN 1097-6:2001. “Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua”.

- [11] AENOR (2003). UNE-EN 12697-8 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 8: Determinación del contenido de huecos en las probetas bituminosas”.
- [12] AENOR (2004a). Norma UNE-EN 933-3/A1:2004. “Determinación de la forma de las partículas. Índice de Lajas”.
- [13] AENOR (2004b). UNE-EN 13043:2002/AC:2004. “Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas”.
- [14] AENOR (2004c). UNE-EN 12697-23. “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23: Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas”.
- [15] AENOR (2005). UNE-EN 933-5:1999/A1:2005. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 5: Determinación del porcentaje de caras de fractura de las partículas de árido grueso”.
- [16] AENOR (2006a). UNE-EN 933-1:1998/A1:2006. “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”.
- [17] AENOR (2006b). Norma UNE-EN 1097-6:2001/A1:2006. “Determinación de la densidad de partículas y absorción de agua”.
- [18] AENOR (2006c). UNE-EN 12697-12 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa”.
- [19] AENOR (2006d). UNE-EN 12697-25. “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 25: Ensayo de compresión cíclico”.
- [20] AENOR (2006e). UNE-EN 12697-26 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26: Rigidez”.
- [21] AENOR (2007a). UNE-EN 1097-2:1999/A1:2007. “Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación”.

- [22] AENOR (2007b). UNE-EN 12697-5:2003+A1. “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 5: Determinación de la densidad máxima”.
- [23] AENOR (2007c). UNE-EN 12697-6:2003+A1. “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6: Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático”.
- [24] AENOR (2007d). UNE-EN 12697-11 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 11: Determinación de la afinidad entre áridos y betún”.
- [25] AENOR (2007e). UNE-EN 12697-24: 2006+A1 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24: Resistencia a la fatiga”.
- [26] AENOR (2008). UNE-EN 12697-22: 2008+A1 “Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 22: Ensayo de rodadura”.
- [27] Akbulut, H.; Güreş, C. (2007). “Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements”. Building and environment 42, p. 1921-1930.
- [28] Alaejos Gutiérrez, P.; Calvo Calzada, B. (2010). “Construcción sostenible. Primeras experiencias en España”. Publicación Cátedra Mariano López Navarro-Universidad de Zaragoza. ISBN 978-84-936583-6-6.
- [29] Al-Jarallah, M.I.; Lee, K.W. (1987). “Evaluation of Hydrated Lime as an Antistripping Additive for Asphalt Mixtures”. Journal of Engineering Scientific 13, p. 65-83.
- [30] Aljassar, A.H.; Al-Fadala, K.B.; Ali, M.A. (2005). “Recycling building demolition waste in hot-mix asphalt concrete: a case study in Kuwait”. Journal of Material Cycles and Waste Management 7 (2), p. 112-115.
- [31] Anónimo (1984). “Concrete Runway Recycled As Asphalt Runway”. Highway & Heavy Construction 127 (9), p. 44-46.
- [32] Arabani, M.; Azarhoosh, A.R. (2012). “The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures”. Construction and Building Materials 35, p. 1-7.

- [33] Arm, M. (2001). "Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests". *Waste Management* 21, p. 235-239.
- [34] Aschuri, I.; Woodward, D.; Woodside, A. (2009). "Permanent deformation characteristics of asphalt concrete containing reclaimed materials". In: *Sixth International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control*, Politecnico di Torino, Italy. Vol. 1, p. 232-242.
- [35] Asphalt Institute (1997). "Mix Design Methods. For Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types. MS-2. 6th Edition".
- [36] ASTM (2005). D 3625-96. "Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water".
- [37] Bagampadde, U. (2004). "On investigation of stripping in bituminous mixtures". Tesis doctoral. Karlstad University.
- [38] Bagampadde, U.; Isacson, U.; Kiggundu, B.M. (2004). "Classical and Contemporary Aspects of Stripping in Bituminous Mixes". *Road Materials and Pavement Design* 5 (1), p. 7-43.
- [39] Banco Mundial (1992). "The World bank and the environment". World Bank. Washington DC.
- [40] Bennert, T.; Papp Jr, W.J.; Maher, A.; Gucunski, N. (2000). "Utilization of Construction and Demolition Debris Under Traffic-Type Loading in Base and Subbase Applications", *Transportation Research Record* 1714, p. 33-39.
- [41] Brown, E.R., Kandhal, P.S.; Zhang, J. (2001). "Performance testing for hot mix asphalt". NCAT Report 01-05.
- [42] Brundtland, G. H. "Our Common Future". Report of the World Commission on Environment and Development, 1987.
- [43] BSi (1996). Draft for Development DD 226:1996. "Method for determining resistance to permanent deformation of bituminous mixtures subject to unconfined dynamic loading".

- [44] Bushal, S.; Li, X.; Wen, H. (2011). "Evaluation of Effects of Recycled Concrete Aggregate on Volumetrics of Hot-Mix Asphalt". *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Record* 2205 (3), p. 36-39.
- [45] Caro, S.; Masad, E.; Bhasin, A.; Little, D.N. (2008). "Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms". *International Journal of Pavement Engineering* 9 (2), p. 81-88.
- [46] CEDEX (2002). Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría General de Medio Ambiente. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. "Catálogo de residuos utilizables en construcción".
- [47] CEDEX (2010). "Catálogo de residuos" [online]. Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Disponible en la web: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx>.
- [48] CEN (2009). EN 933-11:2009/AC 2009. "Test for geometrical properties of aggregates. Part 11: Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate".
- [49] Centeno Ortiz, M. (2006). "Evaluación Técnico-económica de las técnicas de rehabilitación de firmes flexibles a partir del análisis de los resultados de los tramos experimentales paramix". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [50] Chen, M.; Lin, J.; Wu, S. (2011). "Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture". *Construction and Building Materials* 25, p. 3909-3914.
- [51] Cho, Y.; Yun, T.; Kim, I.T.; Choy, N.R. (2011). "The Application of Recycled Concrete Aggregate (RCA) for Hot Mix Asphalt (HMA) base Layer Aggregate." *KSCE Journal of Civil Engineering* 15 (3), p. 473-478.
- [52] Ciesielski, S.K. (1994). "The use of Recyclable Waste Materials in Hot Mix Asphalt Concrete Highways Pavements". *Proceedings of the 3rd Materials Engineering Conference, San Diego, USA*. P. 327-335.

- [53] Cocurullo, A.; Airey, G.D.; Collop A.C.; Sangiorgi, C. (2008). “Indirect Tensile versus Two-point Bending Fatigue Testing”. *Proceedings of the ICE – Transport* 161 (4), p. 207-220.
- [54] Cooper Technology (2006). “CRT-UTM-NU. Servo-Pneumatic Universal Testing Machine. User Manual”.
- [55] Cross, S.A.; Abou-Zeid, M.N.; Wojerkowski, J.B.; Fager, G.A. (1996). “Long-Term Performance of Recycled Portland Cement Concrete Pavement”. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1525, p. 115-123.
- [56] Cupo-Pagano, M.; D’Andrea, A.; Giavarini, C.; Marro, C. (1994). “Use of building demolition waste for asphalt mixes: first results”. *Energy, environment and technological innovation. Proceedings of III International Congress*. P. 203-208.
- [57] Del Val Melus, M.A. (1985). “Estudio de laboratorio para la caracterización como material de firmes de carreteras de los plásticos procedentes del tratamiento de residuos sólidos urbanos”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- [58] Di Benedetto, H.; De La Roche, C. (1998). “State of Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixture”. *RILEM REPORT 17. Bituminous Binders and Mixes*. P. 137-180. Editado por L. Francken.
- [59] Di Benedetto, H.; De La Roche, C.; Baaj, H.; Pronk, A.; Lundström, R. (2004) “Fatigue of bituminous mixtures”. *Materials and Structures* 37, p.202-216.
- [60] ECoticias.com/Red/Agencias (2012). “Cataluña continúa manteniendo niveles elevados en la recuperación de residuos” [online]. Disponible en la web: <http://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/67833/>.
- [61] Ellis, C.; Zhao, B.; Barnes, J.; Jones, N. (2004). “Properties of GGBS-Bitumen Emulsion Systems with Recycled Aggregates”. *Road Materials and Pavement Design* 5 (3), p. 373-383.
- [62] European Commission (2011a). “Waste” [online]. Disponible en la web: <http://ec.europa.eu/environment/waste/index.htm>.

- [63] European Commission (2011b). Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste – SR1. Final Report Task 2.
- [64] FEHRL (2005). “Report recommendations for mixing plants for recycling works (characterization, elaboration plants, uses in road construction of by products”. SAMARIS (Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure). Competitive and Sustainable Growth (GROWTH) Programme.
- [65] FEHRL (2006). “Guide on techniques for recycling in pavement structures”. SAMARIS (Sustainable and Advanced MAterials for Road InfraStructure). Competitive and Sustainable Growth (GROWTH) Programme.
- [66] FHWA (2004b). “Transportation Applications of Recycled Concrete Aggregate”.
- [67] FHWA (2007a). “Protocol P07. Long Term Pavement Performance Project Laboratory Materials Testing and Handling Guide. Test Method for Determining The Creep Compliance, Resilient Modulus and Strength of Asphalt Materials Using The Indirect Tensile Test Device (AC07)”.
- [68] FHWA (2007b). “Protocol P46. Long Term Pavement Performance Project Laboratory Materials Testing and Handling Guide. Test Method for Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Materials and Subgrade Soils (UG07, SS07)”.
- [69] Fischer, C.; Werge, M. (2009). “EU as a Recycling Society”. ETC/CSP working paper 2/2009.
- [70] Garba, R. (2002). “Permanent Deformation Properties of Asphalt Mixtures”. NVF conference, 28 June- 2 July, Reykjavik, Iceland.
- [71] Geiger, B.J. (2010). “The effects of using alkali-silica reaction affected recycled concrete aggregate in hot mix asphalt”. Tesis doctoral. Texas A&M University.
- [72] GERD (2007). La Cyberhoja del GERD 12.
- [73] GERD (2010a). “Control de los Residuos de Construcción y Demolición, RCD, en los Ayuntamientos”.

- [74] GERD (2010b). “Guía Española de áridos reciclados procedentes de RCD” [online]. Disponible en la web: www.caminospaisvasco.com.
- [75] Gobierno de España (2011). Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- [76] Gobierno Vasco. Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (2009) “Manual de Directrices para el uso de Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco”.
- [77] Gómez-Limón Galindo, D.; Rodríguez-Avello, A.; Parra Alfaro, J.L.; Fueyo, L. (2009). “Tendencias internacionales en el reciclado de RCD. Situación actual”. II Congreso Nacional de Áridos. Valencia.
- [78] Gul, W.A. (2008). “Effect of Recycled cement concrete content on rutting behavior of asphalt concrete”. Tesis doctoral. Middle East Technical University. Ankara.
- [79] Hansen, T.C. (1992). “Recycling of Demolished Concrete and Masonry”. Report of Technical Committee 37-Drc Demolition and Reuse of Concrete (RILEM Report No 6), Spon E&FN, UK.
- [80] He, G.P.; Wong, W.G. (2007). “Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials”. *Construction and Building Materials* 21 (8), p. 1809-1819.
- [81] Hicks, R.G. (1991). “Moisture damage in asphalt concrete” (Vol. 175). Transportation Research Board.
- [82] Hınıslioğlu, S.; Açar, E. (2004). “Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix”. *Materials letters* 58 (3), p. 267-271.
- [83] Huang, B.; Dong, Q.; Burdette, E.G. (2009). “Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic materials into Portland cement and asphaltic concrete”. *Construction and Building Materials* 23 (12), p. 3451-3456.
- [84] Huang, Y.; Bird, R.N.; Heidrich, O. (2007). “A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements”. *Resources Conservation & Recycling* 52 (1), p. 58-73.

- [85] Huang, Y.H. (2004) "Pavement analysis and design". Pearson. Prentice Hall.
- [86] Jajliardo, A.P. (2003). "Development of Specification Criteria to Mitigate Top-down Cracking". Master's Thesis, University of Florida.
- [87] Jiménez, J.R.; Agrela, F.; Ayuso, J.; López, M. (2011). "Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-bases de carreteras". *Materiales de Construcción* 61 (302), p. 289-302.
- [88] Junta de Andalucía (2007). Consejería de Obras Públicas y Transportes. "Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía".
- [89] Kent County Council (2005). "The Kent Design Guide. Making it happen. Appendix 0/1. Additional clauses, tables and figures".
- [90] Khalaf, F.M. (2004). "Recycling of clay bricks as aggregate in asphalt concrete". *Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled materials in building and Structures, Barcelona, Spain (Vol. 1, p. 56-65).*
- [91] Khalid, H.A. (2000). "A comparison between bending and diametral fatigue test for bituminous materials". *Materials and Structures* 33 (7), p. 457-465.
- [92] Khandal, P.S.; Chakraborty, S. (1996). "Evaluation of voids in the mineral aggregate for HMA paving mixtures". NCAT Report 96-4.
- [93] Kiggundu, B.M.; Roberts, F.L. (1988). "Stripping in HMA mixtures: state-of-the-art and critical review of test methods". NCAT Report 88-02.
- [94] Kraemer, C.; Pardillo, J.M.; Rocci, S.; G. Romana, M.; Sánchez Blanco, V.; del Val; M.A. (2004). "Ingeniería de Carreteras. Volumen II". Mc Graw Hill.
- [95] Krebs, R.D.; Walker, R.D. (1971) *Highway Materials*. McGraw-Hill Book Co.
- [96] Lee, C.H., Du, J.C.; Shen, D.H. (2012). "Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt". *Construction and Building Materials* 28 (1), p. 66-71.

- [97] Lee, K.W; Mahboub, K.C. (2006). “State of Art: Bituminous Materials Mix Design”. “Asphalt Mix Design and Construction. Past, Present and Future”. ASCE
- [98] Little, D.N.; Epps, J.A. (2001). “The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt”. National Lime Association.
- [99] Lu, Y.; Wright, P.J. (1998). “Numerical approach of visco-elastoplastic analysis for asphalt mixtures”. Computers and Structures 69 (2), p. 139-147
- [100] Lund, H.F. (1996) “The McGraw-Hill recycling handbook”. McGraw-Hill.
- [101] Mallick, R.B.; El-Korchi, T. (2009). “Pavement engineering: Principles and Practice”. CRC Press.
- [102] Mamlouk, M.S.; Sarofim, R.T. (1988). “Modulus of Asphalt Mixtures – An Unresolved Dilemma”. En 67th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- [103] Martínez Lage, I. (2006). “Estudio sobre los residuos de construcción y demolición en Galicia: método de estimación de la producción anual y usos posibles para su reciclaje”. Tesis doctoral. Universidade de A Coruña.
- [104] Martínez, A.H. (2000). “Aseguramiento de la calidad de mezclas bituminosas mediante la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de su ejecución”. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [105] MDOT (2011). “Using Recycled Concrete in MDOT’s Transportation Infrastructure-Manual of Practice”. Final Report.
- [106] Mills-Beale, J.; You, Z. (2010). “The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates”. Construction and Building Materials 24 (3), p. 230-235.
- [107] Ministerio de Fomento (2001). O.C. 8/2001, sobre reciclado de firmes.
- [108] Ministerio de Fomento (2003). ORDEN FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC “secciones de firme” de la Instrucción de Carreteras.

- [109] Ministerio de Fomento (2004). ORDEN FOM/891/2004, de 1 de marzo, por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos.
- [110] Ministerio de Fomento (2008). O.C. 24/08 sobre el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). Artículos: 542-Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso y 543-Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas.
- [111] Ministerio de Fomento (2010). ORDEN FOM/3317/2010, de 17 de diciembre, por la que se aprueba la Instrucción sobre las medidas específicas para la mejora de la eficiencia en la ejecución de las obras públicas de infraestructuras ferroviarias, carreteras y aeropuertos del Ministerio de Fomento.
- [112] Ministerio de Medio Ambiente (2001). “Resolución de 14 de junio de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006”.
- [113] Ministerio de Medio Ambiente (2002). ORDEN MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.
- [114] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009). Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaría de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015.
- [115] Miró Recasens, J.R. (1994). “Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro”. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [116] MOPT (1992). Normas NLT. I.-Ensayos de Carreteras. CEDEX.
- [117] Muniz de Farias, M.; Quiñones Sinisterra, F.; Gómez Jiménez, A.M.; Ribeiro e Souza, M.V.; Farias Falcão, P.R. (2012). “Influence of Asphalt Rubber on the

- Crushing of Recycled Aggregates Used in Dense HMA”. Proceedings of Asphalt Rubber.
- [118] Murali Krishnan, J.; Rajagopal, K.R. (2004). “Thermodynamic Framework for the Constitutive Modeling of Asphalt Concrete: Theory and Applications”. *Journal of Materials in Civil Engineering* 16 (2), p. 155-166.
- [119] Murphy, T.; Bentsen, R.A. (2001). “Marshall mix design: Getting the most of your Marshall mixes”. Humboldt product manual.
- [120] NAPA (1997). “Uses of Waste Asphalt Shingles in HMA. State-of-the-Practice”. Special Report 179.
- [121] NCHRP (1994). “Recycling an Use Of Waste Materials and By-Products in Highway Construction”. Synthesis of Highway Practice 199. Transportation Research Board.
- [122] NCHRP (2002). “Report 465. Simple Performance Test for Superpave Mix Design”. Transportation Research Board.
- [123] NCHRP (2008). “Report 598. Performance-Related Test of Recycle Aggregates for Use in Unbound Pavement Layers”. Transportation Research Board.
- [124] Padilla Rodríguez, A. (2004). “Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista”. Tesina. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [125] Paranavithana, S.; Mohajerani, A. (2006). “Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete” *Resources Conservation & Recycling* 48, p. 1-12.
- [126] Pasetto, M.; Baldo, N. (2010). “Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags”. *Journal of Hazardous Materials* 181, p. 938-948.
- [127] Pavement Interactive (2010). “HMA Weight-Volume Terms and Relationships”. [online]. Disponible en la web: <http://www.pavementinteractive.org/article/hma-weight-volume-terms-and-relationships>.

- [128] Pennsylvania Department of Transportation (2003). "Bituminous Concrete Mixtures, Design, Procedures, and Specifications for Special Bituminous Mixtures". Pub. 27. Change 5.
- [129] Pérez, I., Gallego, J., Toledano, M.; Taibo, J. (2010). "Asphalt mixtures with construction and demolition debris". Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 163, p. 165-174.
- [130] Pérez, I.; R. Pasandín, A.; Gallego, J. (2012a) "Stripping in hot mix asphalt produced by aggregates from construction and demolition waste". Waste Management and Research 30 (1), p. 3-11.
- [131] Pérez, I.; R. Pasandín, A.; Medina, L. (2012b). "Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates". Materials and Design 36, p. 840-846.
- [132] Pérez, I.; Toledano, M.; Gallego, J.; Taibo, J. (2007). "Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris". Materiales de Construcción 57 (285), p. 17-29.
- [133] Petrarca, R.W.; Galdiero, V.A. (1984). "Summary of Testing of Recycled Crushed Concrete" Transportation Research Record 989, p. 19-26.
- [134] Poon, C.S.; Chan, D. (2006). "Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base". Construction and Building Materials 20 (8), p. 578-585.
- [135] Rafi, M.M.; Qadir, A.; Siddiqui, S.H. (2011). "Experimental Testing of Hot Mix Asphalt Mixture made of Recycled Aggregates". Waste Management & Research 29 (12), p. 1316-1326.
- [136] Rakshvir, S.; Barai, S.V. (2006). "Studies on Recycled aggregates-bases concrete". Waste Management and Research 24 (3), p. 225-233.
- [137] Read, J.; Whiteoak, D. (2003). "The Shell Bitumen Handbook". 5ª edición. Shell Bitumen.

- [138] Rubio, M.C.; Moreno, F.; Belmonte, A.; Menéndez, A. (2010). "Reuse of waste material from decorative Quartz solid surfacing in the manufacture of hot bituminous mixes". *Construction and Building Materials* 24 (4), p. 610-618.
- [139] Rueda Páramo, A. (2011). "Tipología de áridos reciclados en Cataluña y su aplicabilidad". Tesis de Master. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [140] Ruiz Rubio, A. (2001). "Experiencia en España con la utilización de residuos y materiales secundarios en carreteras". *Carreteras. Revista Técnica de la Asociación Española de la Carretera* 118, p. 8-25.
- [141] Ruiz Rubio, A.; Jofre Ibáñez, C. (2003). "Manual de firmes de capas tratadas con cemento. Ministerio de Fomento". CEDEX. IECA.
- [142] Sánchez de Juan, M.; Alaejos Gutierrez, P. (2009). "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycle concrete aggregate". *Construction and Building Materials* 23, p. 872-877.
- [143] Santagata F.A.; Canestrari F.; Pasquini, E. (2007). "Mechanical characterization of asphalt rubber-wet process". En *Proceedings of 4th International SIIV Congress*. Palermo. Italy.
- [144] Schutzbach, A.M. (1992). "Case Study of a Full-Depth Asphalt Concrete Inlay". *Transportation Research Record* 1337, p. 42-50.
- [145] Segarra Foradada, J. (2005). "Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón". Tesina. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [146] Seo, Y.; Ei-haggan, O.; King, M.; Lee, J.S.; Kim, Y.R. (2007). "Air void models for the dynamic modulus, fatigue cracking and rutting of asphalt concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering* 19 (10), p. 874-883.
- [147] Shen, D.H.; Du, J.C. (2004). "Evaluation of building materials recycling on HMA permanent deformation". *Construction and Building Materials* 18 (6), p. 391-397.
- [148] Shen, D.H.; Du, J.C. (2005). "Application of Gray Relational Analysis to Evaluate HMA with Reclaimed Building Materials". *Journal of materials in civil engineering* 17 (4), p. 400-406.

- [149] Silva, C.A.R.; Padula, F.R.G. (2010). “Utilização do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas”. XXXII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS.
- [150] Sobhan, M.A.; Zakaria, M. (2001). “Experimental behaviour of bituminous macadam mixes with brick aggregate”. *Journal of Civil Engineering, the Institution of Engineers, Bangladesh*, Vol. CE 29 (1), p. 115-123.
- [151] Solaimanian, M.; Harvey, J.; Tahmoressi, M.; Tandon, V. (2003). “Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements”. En *Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar*. P. 77-101. Transportation Research Board.
- [152] Sousa, J.B.; Craus, J.; Monismith, C.L. (1991). “Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete. SHRP-A/JR-91-104”. Strategic Highway Research Program. National Research Council.
- [153] Symonds, A.; Cowi; PRC Bouwcentrum (1999). “Construction and Demolition Waste Management Practices, and Their Economic Impacts”. Report to DGXI European Commission.
- [154] Tabatabaie, S.A.; Ziari, H.; Khalili, M. (2008). “Modeling Temperature and Resilient Modulus of Asphalt Pavements for Tropic Zones of Iran”. *Asian Journal of Scientific Research* 1 (6), p. 579-588.
- [155] Taha, R.; Al-Rawas, A.; Al-Jabri, K.; Al-Harty, A.; Hassan, H.; Al-Oraimi, S. (2004). “An overview of waste materials recycling in the Sultanate of Oman”. *Resources, Conservation & Recycling* 41 (4), p. 293-306.
- [156] Taibo Pose, J. (2005). “Estudio de las características mecánicas de las mezclas bituminosas en caliente realizadas con residuos de construcción y demolición para capas de base e intermedia de carreteras de bajo tráfico”. Proyecto técnico. Universidade de A Coruña. Profesores responsables: Dr. Ignacio Pérez Pérez y Dra. Mar Toledano Prados.

- [157] Taibo Pose, J.; Pérez, I.; Toledano, M. (2006). “Utilización de residuos de construcción y demolición en mezclas bituminosas en caliente”. VII Congreso Nacional de Firmes.
- [158] Tam, V.W.Y.; Tam, C.M.; Le, K.N. (2007). ”Removal of cement mortar remains from recycled concrete aggregate using pre-soaking approaches”. *Resources, Conservation and Recycling* 50, p. 82-101.
- [159] Thanaya, I.N.A. (2009). “Asphalt-bound masonry block incorporating construction demolition waste”. *ITS Journal of civil engineering* 29 (1), p. 20-27.
- [160] Tino, R.; González, B.; Toribio, J. (2008). “Comportamiento en fatiga de mezclas bituminosas en caliente para refuerzo de firmes”. *Anales de Mecánica de la Fractura* 25 (2), p.730-735.
- [161] Unión Europea (1989). Directiva 89/106/CEE del Consejo, de 21 de diciembre de 1988, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros sobre los productos de construcción.
- [162] Unión Europea (1993). Directiva 93/68/CEE del Consejo, de 22 de julio de 1993, por la que se modifican las directivas.
- [163] Unión Europea (2008). Directiva 2008/98/CE del Parlamento europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- [164] Uzan, J. (1996). “Asphalt Concrete Characterization for Pavement Performance Prediction”. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist* 65, p. 573-607.
- [165] Vegas, I.; Ibáñez, J.A.; Lisbona, A.; Sáez de Cortazar, A.; Frías, M. (2011). “Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections”. *Construction and Building Materials* 25 (5), p. 2674-2682.
- [166] Vegas, I.; Ibáñez, J.A.; San José, J.T.; Urzelai, A. (2008). “Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction”. *Waste Management* 28 (3), p. 565-574.

- [167] Widyatmoko, I. (2008). “Mechanistic-empirical mixtures design for hot mix asphalt pavement recycling”. *Construction and building materials* 22 (2008), p. 77-87.
- [168] Wong, Y.D.; Sun, D.; Lai, D. (2007). “Value-added utilisation of recycled concrete in hot –mix asphalt”. *Waste Management* 27 (2), p. 294-301.
- [169] Xunta de Galicia (2005). “Programa de xestión de residuos de construción y demolición de Galicia 2005-2007”.
- [170] Yeo, R.E.Y.; Sharp, K.G. (1997). “Recycled Crushed Concrete Stabilize with Cementitious Binder, in Investigation into the use of Recycled Crushed Concrete for Road Base Use”. Report prepared by VicRoads et Al. for EcoRecycle Victoria, Australia.
- [171] Yoder, E.J.; Witczak, M.W. (1975) “Principles of pavement design”. Wiley-Interscience Publication. John Wiley & sons, inc. EEUU.
- [172] Zhu, J.; Wu, S.; Zhong, J.; Wang, D. (2012a). “Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings”. *Construction and Building Materials* 29, p. 466-475.
- [173] Zhu, J.; Wu, S.; Zhong, J.; Wang, D. (2012b). “Effect of Substitution of Recycled Aggregate by Natural Aggregate on Related Properties of Blended Aggregate and Asphalt Mixture”. *Key Engineering Materials* 509, p. 128-135.

ANEXOS

Anexo 1

NORMATIVA APLICABLE A LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN

Existe una abundante legislación comunitaria y nacional, de aparición relativamente reciente, aplicable a los residuos de construcción y demolición.

En las tablas A1.1 y A1.2 se indica por orden cronológico la principal normativa comunitaria al respecto.

Disposición	Observaciones	Publicación
Directiva 91/689/CEE del Consejo, de 12 de diciembre de 1991, relativa a los residuos peligrosos.	Aplicable a los residuos peligrosos generados en las obras de construcción y demolición.	DO L 377 de 31.12.1991
Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril 1999 relativa al vertido de residuos.	Establece el régimen para la eliminación de residuos mediante su depósito en vertederos.	DO L 182 de 16.07.1999
Directiva 2000/76/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 4 de diciembre de 2000 relativa a la incineración de residuos.	Establece bases para impedir o limitar los efectos negativos sobre el medio ambiente debidos a la incineración y co-incineración de residuos.	DO L 332 de 28.12.2000
Decisión del Consejo 2003/33/CE, de 19 de diciembre de 2002 por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 1 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.	Propone métodos de análisis y valores límite para determinar la posible admisión de los residuos en los vertederos.	DO L 11 de 16.01.2003

Tabla A1.1.- Normativa comunitaria aplicable a los residuos de construcción y demolición. Parte I.

Disposición	Observaciones	Publicación
Directiva 2006/12/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, relativa a los residuos (sustituye a la derogada Directiva 75/442/CEE).	Directiva marco de residuos. Es básica para limitar la generación de residuos y organizar su tratamiento y eliminación.	DO L 114 de 27.04.2006
Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.	Directiva marco de residuos. Deroga las dos directivas anteriores a partir del 12 de diciembre de 2010.	DO L 312 de 22.11.2008

Tabla A1.2.- Normativa comunitaria aplicable a los residuos de construcción y demolición. Parte II.

En las tablas A1.3 a A1.4 se indica por orden cronológico la principal normativa estatal al respecto.

Disposición	Observaciones	Publicación
Real Decreto 952/1998 de 20 de junio. Modifica el Real decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, básica de residuos tóxicos y peligrosos.	Aplicable a los residuos peligrosos que puedan producirse en obras de construcción y demolición.	BOE nº160 de 5.07.1997
Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos.	Confiere facultades al Gobierno para establecer disposiciones específicas relativas a la producción y gestión de diferentes tipos de residuos, con el fin de prevenir el impacto ambiental de los mismos. Derogada.	BOE nº96 de 22.04.1998
Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006, aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001.	Su vigencia finalizó el 31 de diciembre de 2006.	BOE nº166 de 12.07.2001

Tabla A1.3.- Normativa estatal aplicable a los residuos de construcción y demolición. Parte I.

Disposición	Observaciones	Publicación
Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.	Trasposición de la Directiva 99/31/CE. Establece el régimen jurídico aplicable a las actividades de eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero. Delimita los criterios técnicos mínimos para su diseño, construcción, explotación, clausura y mantenimiento. Trata la adaptación de los vertederos existentes a las exigencias del Real Decreto, así como los impactos ambientales a considerar.	BOE nº25 de 29.01.2002
Orden MAM/304/2002, de 8 de febrero, por la que se publican las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos.	Como su nombre indica, publica las operaciones de valorización y eliminación de residuos, así como una lista de residuos.	BOE nº43 de 19.02.2002
Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos.	Trasposición de la Directiva 2000/76/CE. Establece las medidas a adoptar por las actividades de incineración y co-incineración de residuos, con el fin de limitar los riesgos para la salud humana y los efectos negativos sobre el medio ambiente.	BOE nº142 de 14.06.2003
Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.	Establece el régimen jurídico de la producción y gestión de los RCD. Pretende fomentar, por este orden, su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización. Asegura el correcto tratamiento de los residuos que van a vertedero.	BOE nº38 de 13.02.2008
Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) para el período 2008-2015.	Instaura los objetivos de prevención, reutilización, reciclado, otras formas de valorización y eliminación de los RCD en España, las medidas para conseguirlos, las formas de financiación y el procedimiento de revisión. Incluye los residuos generados en las obras, además de los generados en las instalaciones que den servicio exclusivo a las mismas.	BOE nº49 de 26.02.2009-
Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1481/2001.	Subsana algunas deficiencias en la transposición de la directiva 199/31/CE.	BOE nº185 de 01.08.2009
Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.	Actualiza y mejora la ley 10/1998.	BOE nº181 de 29.07.2011

Tabla A1.4.- Normativa estatal aplicable a los residuos de construcción y demolición. Parte II.

Anexo 2

PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LAS MEZCLAS COMPACTADAS

A la hora de definir las propiedades volumétricas, es preciso distinguir entre el contenido de ligante efectivo, o porcentaje de ligante no absorbido por el árido (P_{be}), y el contenido de ligante absorbido, o porcentaje de ligante absorbido por los poros del árido (P_{ba}) (figuras A2.1 y A2.2). La normativa europea tiene en cuenta esta distinción admitiendo una cierta tolerancia en la determinación de los huecos en el árido mineral con el fin de no sobreestimarlos, mientras que la normativa americana incluye expresiones que permiten determinar ambos contenidos de ligante, efectivo y absorbido. Esta distinción es especialmente importante en el caso de los áridos más porosos, como por ejemplo los ARs, que pueden llegar a absorber una gran cantidad de ligante.

Por un lado, en la figura A2.1. puede verse un diagrama esquemático en el que a la derecha se representan los volúmenes ocupados por los diferentes componentes de las mezclas bituminosas y a la izquierda sus pesos, teniendo en cuenta la absorción de ligante, es decir, diferenciando entre ligante efectivo y ligante absorbido. Por otro lado, en la figura A2.2. se pueden ver los volúmenes y pesos ocupados por los diferentes componentes de las mezclas bituminosas, sin tener en cuenta la absorción de ligante, es decir, suponiendo que no hay absorción de ligante, de tal forma que todo el ligante es efectivo.

Tanto en la figura A2.1 como en la figura A2.2 se han mantenido dos colores (gris y negro) para representar el contenido de ligante, a efectos de poder compararlas entre sí. Si se realiza la citada comparación puede verse como al no tener en cuenta la absorción de ligante, se sobreestima el contenido de huecos en el árido mineral (VMA) y el contenido de huecos rellenos con betún (VFB). Sin embargo, al tener en cuenta la absorción de ligante por parte del árido el contenido de huecos en mezcla (V_m), es decir, el contenido de aire, no varía.

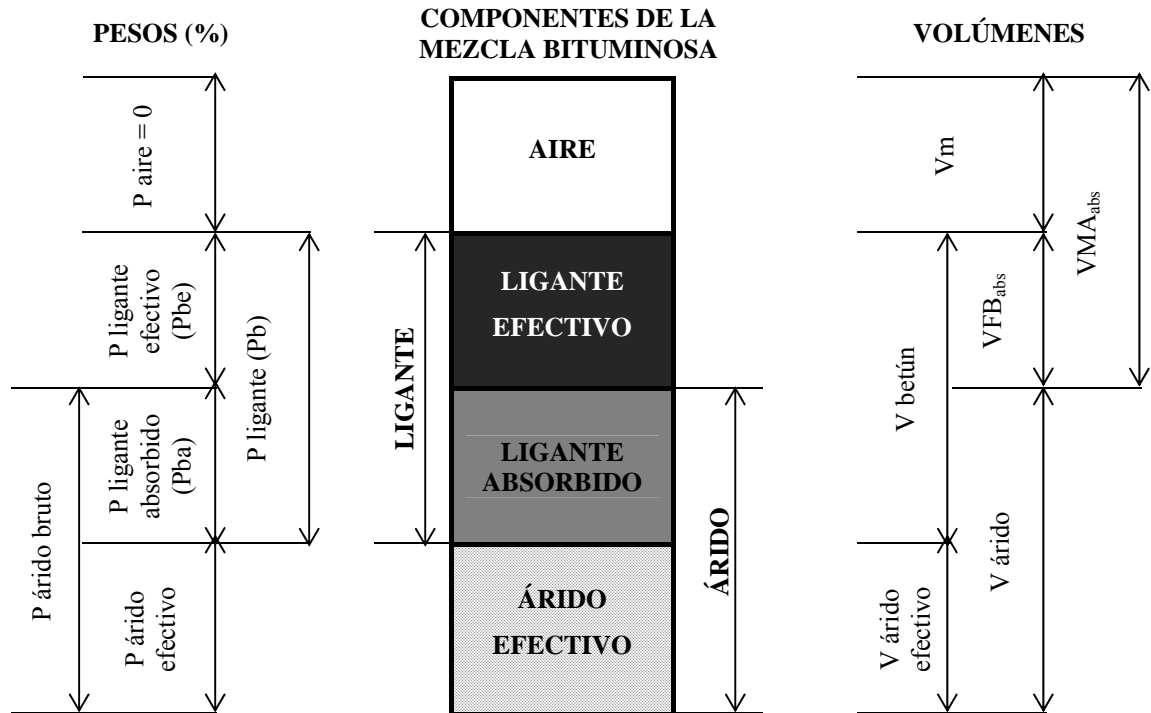


Figura A2.1.- Diagrama de componentes de una mezcla bituminosa, teniendo en cuenta la absorción de ligante. Fuente: elaboración propia a partir de Asphalt Institute, 1997.

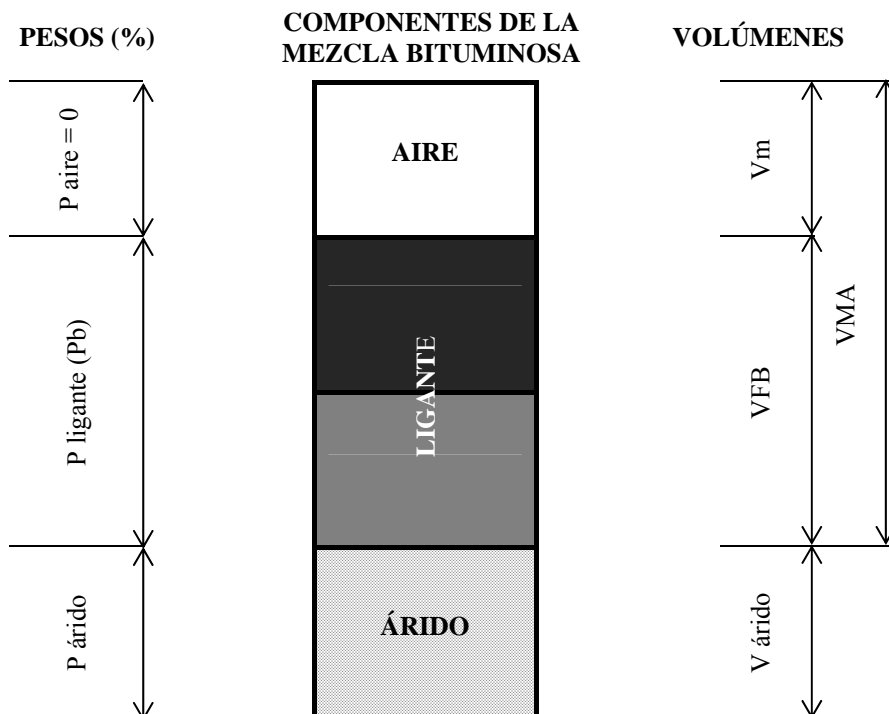


Figura A2.2.- Diagrama de componentes de una mezcla bituminosa, sin tener en cuenta la absorción de ligante. Fuente: elaboración propia a partir de Asphalt Institute, 1997.

Las principales definiciones a tener en cuenta para determinar las propiedades volumétricas de las mezclas compactadas son las que a continuación se indican (Asphalt Institute, 1997 y AENOR, 2003):

- Huecos de aire o huecos en mezcla (V_m): volumen ocupado por los huecos de aire en una probeta bituminosa, expresado como porcentaje del volumen total de la mezcla compactada. Los huecos de aire son las bolsas de aire existentes entre las partículas de áridos recubiertas de ligante en una probeta bituminosa compactada. Se obtiene a partir de la densidad máxima de la mezcla (ρ_m) y de la densidad aparente de la probeta (ρ_b).
- Huecos en el árido mineral (VMA): volumen del espacio ocupado por los huecos intergranulares entre las partículas del árido de una mezcla bituminosa compactada. Incluye los huecos de aire y el volumen del ligante bituminoso de la probeta. Se expresa como un porcentaje del volumen total de la probeta.
- Huecos rellenos con ligante (VFB): porcentaje de huecos rellenos con ligante que existen en el árido mineral, expresado como un porcentaje del volumen de huecos en el árido mineral (VMA).

Se incluyen a continuación las expresiones utilizadas para calcular las propiedades volumétricas de las mezclas compactadas. En el caso de no considerar la absorción de ligante por parte del árido (todo el ligante es efectivo), las expresiones serían las siguientes:

- V_m : huecos en mezcla, expresado en porcentaje sobre el volumen total de la mezcla bituminosa compactada. Se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 (\%) (v/v) \quad (A2.1)$$

donde:

ρ_m = Densidad máxima de la mezcla (kg/m^3). Es la masa por unidad de volumen, sin incluir los huecos de aire, de un material bituminoso, a una

temperatura de ensayo conocida, según la norma UNE-EN 12697-5:2003+A1 (AENOR, 2007b). En la citada norma se especifican diversos procedimientos para la obtención de la densidad máxima: procedimiento volumétrico, hidrostático y matemático.

ρ_b = Densidad aparente de la mezcla (kg/m^3). Es la masa por unidad de volumen, incluidos los huecos de aire, de una probeta de mezcla bituminosa, a una temperatura de ensayo conocida. Para la obtención de la densidad aparente se utiliza la norma UNE-EN 12697-6:2003+A1 (AENOR, 2007c). En esta norma se especifican cuatro procedimientos para la obtención de la densidad aparente: procedimiento en seco, mediante superficie saturada seca (SSD), mediante probeta impermeabilizada y por dimensiones.

- VMA: huecos en el árido mineral, expresado en porcentaje sobre el volumen total de la mezcla bituminosa compactada. Se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\text{VMA} = V_m + P_b \frac{\rho_b}{\rho_B} (\%) (v/v) = \frac{V_m + V_{be}}{V_T} \times 100 \quad (\text{A2.2})$$

donde:

P_b = Contenido de ligante respecto a la masa total de la probeta expresado en porcentaje.

ρ_B = Densidad del ligante (kg/m^3).

V_{be} = Volumen de ligante efectivo.

V_T = Volumen total de la muestra compactada.

- VFB: huecos rellenos con ligante, en porcentaje sobre el volumen de huecos en el árido mineral:

$$VFB = \frac{Pb \frac{\rho_b}{\rho_B}}{VMA} \times 100 (\%) (v/v) = \frac{V_{be}}{V_{be} + V_m} \times 100 \quad (A2.3)$$

En el caso de considerar la absorción del ligante por parte del árido (parte del ligante es efectivo y parte absorbido), las expresiones para determinar Pbe, VMA y VFB serían las que se indican a continuación (Asphalt Institute, 1997):

- Pbe: contenido de ligante efectivo expresado en porcentaje sobre la masa total de la mezcla bituminosa:

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} \times Ps \quad (A2.4)$$

donde:

Ps = Porcentaje de árido respecto al total de la mezcla.

Pba = Ligante absorbido por los poros del árido, respecto a la masa total de árido, determinado según la ecuación 2.5 (Asphalt Institute, 1997):

$$Pba = 100 \times \frac{Gse - Gsb}{Gse \times Gsb} \times Gb \quad (A2.5)$$

donde:

Gsb = Densidad relativa de las partículas sueltas. Es el cociente entre la densidad de las partículas tras secado en estufa (ρ_{rd}) obtenida según la norma UNE-EN 1097-6 (AENOR, 2001 y 2006b), y la densidad del agua (ρ_w).

Gse = Densidad relativa efectiva de los áridos, obtenida a partir de la ecuación 2.6 (Asphalt Institute, 1997).

$$Gse = \frac{\frac{Pmm - Pb}{Pmm} - \frac{Pb}{Gb}}{\frac{Pmm}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb}} \quad (A2.6)$$

donde:

P_{mm} = Porcentaje de la mezcla bituminosa suelta respecto a la masa total de la mezcla suelta (100%).

G_{mm} = Densidad máxima relativa de la mezcla bituminosa. Es el cociente entre la densidad máxima de la mezcla (ρ_m) obtenida según la norma UNE-EN 12697-5:2003+A1 (AENOR, 2007b) y la densidad del agua (ρ_w).

G_b = Densidad relativa del ligante, obtenida como cociente entre la densidad del ligante (ρ_B) y la densidad del agua (ρ_w).

- VMA y VFB:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad (A2.7)$$

$$VFB = 100 \times \frac{VMA - V_m}{VMA} \quad (A2.8)$$

donde:

G_{mb} = Densidad aparente relativa de la mezcla. Es el cociente entre la densidad aparente de la mezcla (ρ_b) obtenida según la norma UNE-EN 12697-6:2003+A1 (AENOR, 2007c) y la densidad del agua (ρ_w).

Las propiedades volumétricas tienen una amplia utilización en el diseño de las mezclas bituminosas, sirven de ayuda para pasar de volúmenes a pesos y viceversa. Además están relacionadas con el comportamiento de las mezclas bituminosas (Mallick, 2009). En este sentido, es bien conocido el efecto negativo que tiene el contenido de huecos de aire sobre el envejecimiento de la mezcla bituminosa y su resistencia a la fatiga: a mayor contenido de huecos de aire (V_m), el proceso de envejecimiento se producirá de forma más acelerada, por lo que la durabilidad de la mezcla será menor (Khandal y Chakraborty, 1996). Además, también se produce una disminución de la vida del firme por fatiga (Seo et al., 2007), de tal forma que para un contenido de huecos de aire superior al 6% se considera que la mezcla es susceptible a fallar por fatiga (Murali Krishnan y Rajagopal, 2004). Por otro lado, un

contenido mínimo de huecos en el árido mineral (VMA), garantiza el espacio suficiente para poder acomodar el contenido óptimo de ligante. Un contenido mínimo del 3% de huecos en mezcla (V_m) previene la formación de roderas (Murali Krishnan y Rajagopal, 2004). También el contenido de huecos rellenos de ligante (VFB) está relacionado con la durabilidad de la mezcla, de tal forma que cuanto menor sea VFB menor será también la durabilidad (Murphy y Bentsen, 2001).

Anexo 3

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

3.1. RESULTADOS DEL ENSAYO MARSHALL

Se adjuntan a continuación los valores medios obtenidos como resultado del ensayo Marshall, tanto para probetas que han sido sometidas al pretratamiento de 4 horas de repose en estufa (tabla A3.1) como para probetas sin pretratamiento (tabla A3.2).

Serie		Pb (%) s/mezcla	ρ_b (g/cm ³)	E	Ep	D	Dp	Vm (%)	VMA (%)	VFB (%)	VMA ^{abs} (%)	VFB ^{abs} (%)	M	Mp
				(kN)		(mm)							(KN/mm)	
Reposo de 4 horas en estufa	00C-4H	3,0	2,358	15,5	14,7	3,0	1,7	10,7	17,7	39,7	15,6	31,4	5,2	8,6
		3,5	2,401	16,9	16,0	2,9	1,7	8,5	16,9	49,5	14,5	41,3	5,8	9,4
		4,0	2,403	18,5	17,5	3,6	2,1	7,6	17,1	55,7	14,9	49,2	5,1	8,3
		4,5	2,433	18,7	17,8	4,9	2,2	5,7	16,6	65,4	14,3	59,7	3,8	8,1
	05C-4H	4,0	2,416	20,7	19,7	4,3	2,3	6,7	16,3	58,8	15,6	50,9	4,8	8,6
		4,5	2,440	20,5	19,5	4,4	2,4	5,0	15,9	68,4	13,3	62,1	4,7	8,1
		5,0	2,455	19,1	18,1	4,8	2,7	3,7	15,9	76,5	13,2	71,8	4,0	6,7
		5,5	2,455	16,1	15,3	5,0	2,9	3,2	16,6	80,9	13,7	76,9	3,2	5,3
	10C-4H	4,0	2,405	18,5	17,6	5,0	2,6	6,8	16,3	58,5	14,8	54,3	3,7	6,8
		4,5	2,422	18,1	17,2	4,5	2,5	5,1	16,0	67,8	14,7	64,9	4,0	6,9
		5,0	2,451	20,5	19,5	5,1	2,7	3,4	15,6	78,1	14,1	75,8	4,0	7,2
		5,5	2,452	17,6	16,7	4,1	2,5	2,8	16,2	82,8	14,5	80,8	4,3	6,7
	20C-4H	3,5	2,336	20,8	19,7	3,9	2,4	9,7	17,8	45,6	13,9	30,5	5,3	8,2
		4,0	2,353	19,9	18,9	3,2	2,0	8,3	17,6	53,0	13,8	39,8	6,2	9,5
		4,5	2,339	16,4	15,6	4,2	2,3	8,1	18,5	56,4	14,7	45,2	3,9	6,8
		5,0	2,369	17,3	16,5	3,8	2,2	6,1	17,8	66,0	14,1	57,0	4,6	7,5
	30C-4H	4,0	2,332	19,9	18,9	4,7	2,4	8,7	17,9	51,7	13,1	34,1	4,2	7,9
		4,5	2,346	18,5	17,6	4,5	2,5	7,0	17,5	59,8	13,1	46,1	4,1	7,0
		5,0	2,350	17,4	16,5	4,9	2,6	6,0	17,7	65,8	13,4	54,6	3,6	6,3
		5,5	2,368	19,9	18,9	4,4	2,3	4,9	17,8	72,5	13,1	62,7	4,5	8,2

Tabla A3.1.- Resultados medios obtenidos en el ensayo Marshall. Mezclas con pretratamiento de 4 horas de repose en estufa.

Serie		Pb (%) s/mezcla	ρ_b (g/cm ³)	E	Ep	D	Dp	Vm (%)	VMA (%)	VFB (%)	VMA ^{abs} (%)	VFB ^{abs} (%)	M	Mp
				(kN)		(mm)							(KN/mm)	
Sin pretratamiento	00N-0H	3,0	2,395	11,1	10,5	3,7	2,0	8,7	15,9	44,9	14,3	38,9	3,0	5,3
		3,5	2,417	12,7	12,1	3,7	2,2	7,1	15,5	54,0	14,0	48,8	3,4	5,5
		4,0	2,437	13,4	12,8	4,1	2,3	5,6	15,3	63,4	13,7	59,2	3,3	5,6
		4,5	2,445	13,4	12,7	4,0	2,3	4,6	15,5	70,3	13,9	66,7	3,4	5,5
	00C-0H	3,0	2,386	11,6	11,0	4,3	2,1	9,6	16,7	42,5	15,0	36,2	2,7	5,2
		3,5	2,406	12,8	12,2	4,2	2,2	7,9	16,2	51,4	14,8	46,6	3,0	5,5
		4,0	2,454	15,1	14,3	5,1	2,7	5,2	15,0	65,2	13,5	61,6	3,0	5,3
		4,5	2,447	13,1	12,5	4,3	2,4	4,3	15,3	71,5	14,2	69,3	3,0	5,2
	05C-0H	3,0	2,365	10,4	9,9	5,1	2,3	10,2	17,3	40,8	15,1	32,1	2,0	4,3
		4,0	2,414	12,5	11,9	4,7	2,5	7,1	16,8	57,3	14,2	49,7	2,7	4,8
		4,5	2,440	14,3	13,6	4,8	2,7	4,8	15,8	69,3	13,7	64,8	3,0	5,0
		5,0	2,468	14,4	13,7	5,1	3,0	3,1	15,4	79,6	13,2	76,3	2,8	4,6
		6,0	2,458	13,5	12,8	5,7	3,3	1,9	16,6	88,2	14,5	86,5	2,4	3,9
	10C-0H	3,0	2,370	13,4	12,8	4,2	2,2	9,9	17,0	41,6	14,2	30,0	3,2	5,8
		4,0	2,397	12,9	12,2	4,5	2,4	6,8	16,4	58,0	14,1	51,3	2,9	5,1
		4,5	2,418	13,7	13,0	4,7	2,5	5,2	16,1	67,0	13,8	61,5	2,9	5,2
		5,0	2,440	13,4	12,7	5,4	2,9	3,6	15,9	76,4	13,5	72,3	2,5	4,4
		6,0	2,446	12,7	12,1	5,9	3,2	1,8	16,5	88,6	14,2	86,9	2,2	3,8
	20C-0H	3,0	2,309	11,1	10,6	4,2	2,2	9,9	16,9	40,8	15,0	33,4	2,6	4,8
		4,0	2,356	14,4	13,7	4,9	2,5	7,4	16,8	55,7	14,1	47,4	2,9	5,5
		4,5	2,381	15,2	14,4	5,5	2,8	5,3	16,0	66,5	13,7	60,8	2,8	5,1
		5,0	2,389	13,8	13,1	4,4	2,7	5,3	17,2	69,1	13,8	61,2	3,1	4,9
		6,0	2,378	14,5	13,7	5,7	3,3	3,3	17,6	80,5	15,2	77,3	2,5	4,2
	30C-0H	3,0	2,292	10,2	9,7	4,2	2,4	11,1	18,0	38,1	14,1	21,3	2,4	4,0
		4,0	2,359	12,9	12,2	4,4	2,6	7,2	16,6	56,6	12,5	42,5	2,9	4,7
		4,5	2,371	15,3	14,5	4,3	2,7	6,2	16,8	63,2	12,5	50,8	3,6	5,4
		5,0	2,400	14,9	14,1	4,4	2,8	3,4	15,3	78,0	11,9	71,9	3,4	5,0
		6,0	2,395	13,6	12,9	4,7	3,0	1,5	15,8	90,6	13,0	88,6	2,9	4,3

Tabla A3.2.- Resultados medios obtenidos en el ensayo Marshall. Mezclas sin pretratamiento.

3.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE RIGIDEZ A TRACCIÓN INDIRECTA

AR (%)	Betún (%)		Diámetro (mm)				Altura (mm)				Densidad aparente (kg/m³)			
			Pretratamiento				Pretratamiento				Pretratamiento			
			4 horas de reposo en estufa	2 horas de reposo en estufa	0 horas de reposo en estufa	Preenvuelta con ECL-2d	4 horas de reposo en estufa	2 horas de reposo en estufa	0 horas de reposo en estufa	Preenvuelta con ECL-2d	4 horas de reposo en estufa	2 horas de reposo en estufa	0 horas de reposo en estufa	Preenvuelta con ECL-2d
0	Óptimo	4,0	101,4	-			63,0	-			2.452,9	-		
5		3,8	101,5				63,2				2.389,0			
10		3,9	101,4				63,9				2.354,7			
20		4,4	101,4				64,2				2.368,8			
30		4,3	101,4				64,3				2.317,3			
0	3,5		101,6	101,5	101,5	-	63,7	64,0	62,9	-	2.358,4	2.414,5	2.401,1	-
5			101,5	101,4	101,5	101,5	63,5	64,4	63,8	62,3	2.377,8	2.384,1	2.391,2	2.395,6
10			101,5	101,5	101,6	101,5	64,7	64,5	63,8	63,1	2.372,5	2.359,4	2.365,0	2.354,6
20			101,4	101,5	101,5	101,4	65,5	64,9	63,5	64,6	2.344,1	2.347,8	2.330,7	2.349,3
30			101,5	101,5	101,5	101,4	65,7	65,5	64,8	64,9	2.323,1	2.295,6	2.314,1	2.330,3
0	4,0		101,5	101,5	101,4	-	63,4	63,5	63,2	-	2.410,0	2.415,8	2.426,1	-
5			101,4	101,5	101,5	101,4	63,5	63,4	63,0	63,7	2.385,2	2.387,6	2.409,1	2.401,7
10			101,5	101,4	101,5	101,4	63,5	63,3	63,5	63,1	2.395,6	2.373,8	2.379,9	2.397,2
20			101,4	101,5	101,5	101,5	64,7	64,9	63,8	63,5	2.329,4	2.336,9	2.346,4	2.381,5
30			101,4	101,5	101,5	101,5	65,4	65,7	64,7	63,7	2.265,4	2.302,7	2.316,7	2.385,3
0	4,5		101,4	101,4	101,5	-	62,4	61,5	62,5	-	2.436,4	2.445,4	2.437,0	-
5			101,4	101,4	101,5	101,4	63,2	62,2	62,6	62,5	2.416,3	2.430,4	2.388,8	2.431,0
10			101,4	101,5	101,5	101,4	63,5	62,4	63,3	62,4	2.410,8	2.397,8	2.396,6	2.428,9
20			101,5	101,5	101,5	101,5	64,5	63,4	63,9	62,9	2.346,2	2.389,4	2.371,1	2.382,9
30			101,5	101,5	101,5	101,4	65,7	63,6	63,9	63,4	2.303,3	2.341,3	2.337,5	2.387,5
Número total de probetas fabricadas														124

Tabla A3.3.- Descripción de las probetas fabricadas para obtener el módulo resiliente.

Anexo 3. Resultados de los ensayos de laboratorio

AR (%)	Betún (%)		0°C				10°C				20°C			
			Pretratamiento				Pretratamiento				Pretratamiento			
			4 horas de reposo en estufa	2 horas de reposo en estufa	0 horas de reposo en estufa	Preenvuelta con ECL-2d	4 horas de reposo en estufa	2 horas de reposo en estufa	0 horas de reposo en estufa	Preenvuelta con ECL-2d	4 horas de reposo en estufa	2 horas de reposo en estufa	0 horas de reposo en estufa	Preenvuelta con ECL-2d
0	Óptimo	4,0	22.857,5	-			17.425,0	-			8.890,0	-		
5		3,8	24.117,5				15.632,0				9.532,0			
10		3,9	23.407,0				15.492,5				10.316,0			
20		4,4	26.673,5				20.167,0				10.826,5			
30		4,3	22.277,5				18.001,5				10.527,0			
0	3,5		20.348,0	21.503,5	22.269,0	-	15.129,5	13.413,0	14.346,5	-	9.314,5	6.527,0	4.924,0	-
5			24.191,5	22.638,0	19.958,5	23.342,5	19.139,5	13.063,0	10.638,5	12.949,5	11.628,0	6.398,0	3.786,5	5.660,5
10			22.385,5	21.202,5	19.586,0	23.697,0	16.303,0	13.383,5	10.399,0	13.851,5	9.944,0	6.218,5	4.167,5	6.409,0
20			20.811,5	21.135,5	20.415,0	21.089,5	15.938,0	12.377,5	11.888,5	12.119,0	9.859,0	5.447,0	5.629,5	5.654,5
30			22.529,0	20.102,0	20.313,5	19.703,5	16.848,0	13.537,5	11.207,0	12.177,5	11.697,0	7.113,0	5.663,0	4.748,0
0	4,0		22.857,5	24.174,0	23.065,5	-	17.425,0	13.650,0	13.391,0	-	9.517,5	6.235,0	5.309,5	-
5			26.625,5	23.198,0	20.961,0	23.650,5	17.981,5	14.463,5	12.049,0	13.377,0	10.387,0	6.538,0	4.485,0	5.609,0
10			24.992,5	23.685,0	21.328,0	22.259,0	16.747,0	15.038,5	11.565,5	12.618,0	8.354,0	6.885,5	4.648,5	5.301,0
20			21.664,0	20.678,5	21.629,0	21.143,0	17.288,0	12.740,5	11.860,5	11.115,5	7.488,5	5.570,5	4.940,5	4.665,5
30			21.372,5	20.029,5	20.882,5	20.289,0	15.109,5	12.668,0	10.868,0	12.615,0	9.037,5	6.265,0	4.267,0	4.858,0
0	4,5		24.459,5	25.146,5	22.666,5	-	16.495,0	16.823,5	12.801,5	-	8.534,5	7.490,5	4.853,5	-
5			23.727,0	21.112,5	22.585,5	22.187,5	14.371,5	11.769,0	12.859,0	12.042,5	7.927,5	5.399,5	4.749,5	4.664,0
10			23.679,5	22.621,0	21.681,5	21.463,5	17.689,5	14.213,0	14.154,5	11.412,5	9.558,5	6.387,5	5.390,0	4.869,0
20			25.743,0	25.812,5	21.184,5	23.381,0	16.675,0	15.163,5	12.170,0	12.220,5	9.021,0	6.820,0	4.817,5	5.067,5
30			21.341,0	24.144,0	22.349,0	20.924,0	16.814,5	15.523,0	13.534,5	10.840,0	7.707,5	7.419,0	5.086,5	4.413,5

Tabla A3.4.- Módulos resilientes obtenidos (MPa).

Anexo 4

RESULTADOS DEL PROGRAMA KENPAVE

Se incluyen a continuación (figuras A4.1 a A4.5) los resultados de los cálculos de la deformación horizontal de tracción (“radial strain”) en la fibra inferior de la mezcla AC 22 base G fabricada con pretratamiento de 4 horas de reposo en estufa, contenido óptimo de ligante y diferentes porcentajes de AR (0%, 5%, 10%, 20% y 30%).

```

INPUT FILE NAME  -C:\KENPAVE\T00-00AR5C.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -SECCIÓN 0032 0% AR

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0,01
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 5
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 2
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 3  7  15  30
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0,35  0,33  0,35  0,25  0,4
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0  25
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :    1  4,000E+06    2  6,000E+06
          3  8,890E+06    4  8,000E+06    5  3,000E+05

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- = 15,96
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 800
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1    LOAD GROUP NO. 1

      RADIAL      VERTICAL      VERTICAL      VERTICAL      RADIAL      TANGENTIAL      SHEAR
COORDINATE      COORDINATE      DISPLACEMENT      STRESS      STRESS      STRESS      STRESS
              (STRAIN)              (STRAIN)              (STRAIN)              (STRAIN)
0,00000      0,00000      0,00784      800,000      133,361      133,361      0,000
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00855      -1,726E-06      1,411E-05      1,411E-05      ,000E+00
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00855      298,477      20,327      20,327      0,000
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00855      3,197E-05      -1,026E-05      -1,026E-05      ,000E+00
(STRAIN)

```

Figura A4.1.- Estado tensodeformacional obtenido mediante el programa KENPAVE para la mezcla AC 22 base G con un 0% de AR.


```

INPUT FILE NAME  -C:\KENPAVE\T00-05ARSC.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -SECCIÓN 0032 5% AR
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0,01
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 5
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 2
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 3 7 15 30
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0,35 0,33 0,35 0,25 0,4
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 25
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :      1  4,000E+06      2  6,000E+06
          3  9,532E+06      4  8,000E+06      5  3,000E+05

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- = 15,96
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 800
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1    LOAD GROUP NO. 1

      RADIAL      VERTICAL      VERTICAL      VERTICAL      RADIAL      TANGENTIAL      SHEAR
COORDINATE      COORDINATE      DISPLACEMENT      STRESS      STRESS      STRESS      STRESS
              (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)
0,00000      0,00000      0,00780      800,000      132,350      132,350      0,000
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00850      -1,549E-06      1,394E-05      1,394E-05      ,000E+00
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00850      295,311      5,669      5,669      0,000
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00850      3,056E-05      -1,046E-05      -1,046E-05      ,000E+00
(STRAIN)

```

Figura A4.2.- Estado tensodeformacional obtenido mediante el programa KENPAVE para la mezcla AC 22 base G con un 5% de AR.

```

INPUT FILE NAME  -C:\KENPAVE\T1-10ARSC.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED =  1

TITLE -SECCIÓN 132 10% AR

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) =  1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) =  1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- =  0,01
NUMBER OF LAYERS (NL)----- =  5
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- =  2
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- =  80
COMPUTING CODE (NSTD)----- =  9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- =  1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 3  7  10  20
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0,35  0,33  0,35  0,25  0,4
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE:  0  20
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :      1  4,000E+06      2  6,000E+06
          3  1,032E+07      4  8,000E+06      5  3,000E+05

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- =  15,96
CONTACT PRESSURE (CP)----- =  800
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE :  0

PERIOD NO.  1      LOAD GROUP NO.  1

      RADIAL      VERTICAL      VERTICAL      VERTICAL      RADIAL      TANGENTIAL      SHEAR
COORDINATE  COORDINATE  DISPLACEMENT  STRESS      STRESS      STRESS      STRESS
              (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)
0,00000      0,00000      0,01019      800,000      174,642      174,642      0,000
(STRAIN)                                -8,950E-06    2,082E-05    2,082E-05    ,000E+00
0,00000      20,00000      0,01146      358,804      -15,287      -15,287      0,000
(STRAIN)                                3,582E-05   -1,314E-05   -1,314E-05   ,000E+00

```

Figura A4.3.- Estado tensodeformacional obtenido mediante el programa KENPAVE para la mezcla AC 22 base G con un 10% de AR.

```

INPUT FILE NAME  -C:\KENPAVE\T00-20ARSC.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -SECCIÓN 0032 20% AR
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0,01
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 5
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 2
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 3  7  15  30
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0,35  0,33  0,35  0,25  0,4
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0  25
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :    1  4,000E+06    2  6,000E+06
          3  1,083E+07    4  8,000E+06    5  3,000E+05

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- = 15,96
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 800
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1    LOAD GROUP NO. 1

      RADIAL      VERTICAL      VERTICAL      VERTICAL      RADIAL      TANGENTIAL      SHEAR
COORDINATE  COORDINATE  DISPLACEMENT  STRESS      STRESS      STRESS      STRESS
              (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)
0,00000      0,00000      0,00773      800,000      130,459      130,459      0,000
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00842      -1,218E-06   1,364E-05   1,364E-05   ,000E+00
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00842      289,236      -23,385      -23,385      0,000
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00842      2,823E-05   -1,075E-05   -1,075E-05   ,000E+00
(STRAIN)

```

Figura A4.4.- Estado tensodeformacional obtenido mediante el programa KENPAVE para la mezcla AC 22 base G con un 20% de AR.

```

INPUT FILE NAME  -C:\KENPAVE\T00-30ARSC.DAT
NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1
TITLE -SECCIÓN 0032 30% AR
MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0,01
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 5
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 2
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 3  7  15  30
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0,35  0,33  0,35  0,25  0,4
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0  25
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE :    1  4,000E+06    2  6,000E+06
          3  1,053E+07    4  8,000E+06    5  3,000E+05

LOAD GROUP NO. 1 HAS 1 CONTACT AREA
CONTACT RADIUS (CR)----- = 15,96
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 800
RADIAL COORDINATES OF 1 POINT(S) (RC) ARE : 0

PERIOD NO. 1    LOAD GROUP NO. 1

      RADIAL      VERTICAL      VERTICAL      VERTICAL      RADIAL      TANGENTIAL      SHEAR
COORDINATE      COORDINATE      DISPLACEMENT      STRESS      STRESS      STRESS      STRESS
              (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)      (STRAIN)
0,00000      0,00000      0,00775      800,000      130,880      130,880      0,000
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00844      -1,292E-06      1,370E-05      1,370E-05      ,000E+00
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00844      290,597      -16,718      -16,718      0,000
(STRAIN)
0,00000      25,00000      0,00844      2,872E-05      -1,069E-05      -1,069E-05      ,000E+00
(STRAIN)

```

Figura A4.5.- Estado tensodeformacional obtenido mediante el programa KENPAVE para la mezcla AC 22 base G con un 30% de AR.